

Desenvolvimento e Concepção de Ferramentas de Estampar

Gestamp Aveiro, SA

João Bruno Rodrigues Fragoso

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador na Gestamp Aveiro, SA: Eng. Nuno Cavaca

Orientador na FEUP: Prof. Abel Santos



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro 2011

*Esta tese não foi escrita de acordo com o novo acordo ortográfico
(Fevereiro 2011)*

Resumo

A obtenção de componentes através da conformação de chapa representa um processo de produção importante, comumente aplicado na indústria automóvel. Para produzir estes componentes é necessária a produção de ferramentas que por sua vez irão incorporar as etapas necessárias para a produção da peça, assegurando a ausência de fissuras ou outros defeitos. Actualmente, o ciclo de vida dos produtos tende a diminuir, novos materiais são utilizados e difíceis geometrias precisam de ser produzidas. Por estas razões, os projectistas de ferramentas não podem confiar nos métodos convencionais de projecto, experiência anterior e fórmulas empíricas, devido aos diferentes comportamentos dos novos materiais assim como a complexidade e desafio de novos componentes. O uso do Método dos Elementos Finitos para realização de simulações de processos de conformação de chapa fornece uma eficiente aproximação aquando do desenvolvimento de um novo componente e da ferramenta necessária à sua produção.

Neste trabalho é apresentado o uso da simulação de elementos finitos, durante a fase de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem para um determinado componente. Ao realizar as simulações, os resultados mostraram diversos problemas, como excesso de tensões, que criariam dificuldades em obter com sucesso a peça pretendida. Tais resultados foram a base para a mudança e melhoria das etapas do processo do componente. Incluídas no desenvolvimento do processo, a optimização da geometria e das dimensões de chapa foram também consideradas através do uso de funções específicas. Neste trabalho, resultados experimentais são também incluídos, o que permite a validação dos resultados das simulações.

Development and Conception of Die Tools

Abstract

Sheet metal forming of components represents an important production process, being commonly applied in the automobile industry. To process these components one requires the manufacturing of tools, which in turn will incorporate the needed steps to process the part successfully, thus assuring no breakages or other defects. Nowadays, life cycles of products tend to decrease, new materials are used and difficult geometries need to be produced. For these reasons tool designers may not rely on conventional methods of design by using previous experience and empirical formulas, due to different behaviors of new materials as well as complexities and challenges of new components. The use of finite element method when performing the simulation of metal forming processes is providing an efficient approach when developing a new component and the corresponding stamping dies needed to its processing.

In this work it is presented the use of finite element simulation, during the development stage of the stamping dies, for a selected component. When performing first simulations, results have shown a variety of problems, like excessive strain, which would create difficulties obtaining the part with success. Such results were the basis for changing and improving the steps to processing the component. Included in the development of the process, the optimization of geometry and blank dimensions were also considered by using special functions of the code. In this work, experimental results will also be included, which will allow the validation of presented simulation results.

Agradecimentos

À Gestamp Aveiro, SA pela disponibilização das suas instalações e equipamentos e pelo apoio dado ao projecto.

Ao pessoal da Gestamp Aveiro, SA que sempre se mostrou disponível para me ajudar neste projecto, com especial apreço à equipa do Departamento de Construção de Ferramentas (DCF).

Um agradecimento especial ao Eng. Nuno Cavaca pela oportunidade que me concedeu nesta equipa, pelo apoio e incentivo e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Abel Santos pelo envolvimento e pela orientação que me permitiram um significativo melhoramento do trabalho realizado.

Um forte agradecimento a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo deste curso.

Um obrigado à Argyro pelo apoio e bons momentos que partilhou comigo.

O maior dos agradecimentos à minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio e contribuição para toda a minha formação.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Apresentação da Gestamp Aveiro, SA	1
1.2	O Projecto na Gestamp Aveiro, SA	2
1.3	O trabalho desenvolvido na Gestamp Aveiro, SA	3
1.4	Organização do Relatório	4
2	Fundamentos da conformação plástica de chapas	5
2.1	Introdução	5
2.2	Corte.....	6
2.3	Dobragem.....	7
2.4	Embutidura.....	8
2.5	Modos de formação	8
2.6	Prensas	9
2.6.1	Prensas Mecânicas	10
2.6.2	Prensas Hidráulicas.....	10
2.6.3	Características Comuns.....	11
2.6.3.1	Estrutura	11
2.6.3.1.1	Colo de Cisne	11
2.6.3.1.2	Duplo Montante	11
2.6.3.2	Corrediça	11
2.7	Sistemas de alimentação	12
2.8	Ferramentas.....	13
2.9	Extracção de Resíduos	14
2.10	Lubrificação	14
2.11	Componentes Normalizados	17
2.12	Materiais	20
2.12.1	Anisotropia.....	20
2.12.2	Encruamento	22
3	Método de Elementos Finitos na construção de ferramentas	23
3.1	Conceitos do programa de elementos finitos utilizado.....	25
3.1.1	Definição da Geometria	25
3.1.2	Concepção dos componentes da ferramenta.....	25

3.1.3	Definição de contorno.....	26
3.1.4	Resultados fundamentais a considerar	26
4	Uso do Método dos Elementos Finitos no projecto de uma ferramenta de estampar	27
4.1	Apresentação da peça estampada.....	27
4.1.1	Condições Físicas de Controlo (CPC)	29
4.1.2	Zona de Tolerâncias.....	30
4.1.3	Material	30
4.2	Apresentação das etapas de realização do componente.....	30
4.2.1	Primeira Operação – Corte, furação e marcação	32
4.2.2	Segunda Operação – Corte, dobragem das janelas e embutidos.....	35
4.2.3	Terceira Operação – Estampagem das abas e das nervuras.....	36
4.2.4	Quarta Operação – Estampagem das faces laterais.....	38
4.2.5	Quinta Operação – Furação lateral e separação	40
4.3	Apresentação do trabalho de simulação realizado.....	40
4.3.1	Definição das dimensões do esboço (chapa inicial)	40
4.3.2	Definição do contorno do planificado	42
4.3.2.1	Contorno das janelas.....	42
4.3.2.1.1	Preparação da simulação	42
4.3.2.1.2	Verificação dos resultados intermédios da simulação	47
4.3.2.1.3	Início do processo de definição do contorno (operação de trim)	48
4.3.2.1.4	Resultados da operação de trim.....	49
4.3.2.2	Contorno exterior da peça.....	50
4.3.2.3	Notas complementares.....	53
4.3.3	Simulação Completa de Todo o Processo de Estampagem	54
4.3.3.1	Primeira Operação – Corte e furação	54
4.3.3.2	Segunda Operação – Corte, dobragem das janelas e embutidos	55
4.3.3.3	Terceira Operação – Estampagem das abas e das nervuras.....	56
4.3.3.4	Soluções para o problema da aba das janelas	58
4.3.3.4.1	Alteração do posicionamento da dobragem das janelas.....	58
4.3.3.4.2	Redução do ângulo da pré-dobragem.....	59
4.3.3.4.3	Remoção da pré-dobragem	60
4.3.3.5	Quarta Operação – Estampagem das faces laterais	62
4.3.3.5.1	O efeito do retorno elástico na quarta operação.....	63

4.3.3.6	Quinta Operação – Furação lateral e separação.....	64
4.3.4	Solicitação de uma modificação na peça	64
4.3.4.1	Análise de diferentes soluções e correspondentes resultados.....	65
4.3.4.2	Proposta de alteração da peça.....	68
5	Uso do Método dos Elementos Finitos para aprovação do processo de embutidura de uma peça.....	70
5.1	Peças esquerda e direita, ligadas por uma superfície longitudinal	71
5.2	Peças esquerda e direita, ligadas por uma superfície transversal	72
5.2.1	Proposta de alteração de raio de concordância	74
6	Validação dos Resultados Numéricos.....	75
6.1	Estampagem Directa com Almofada	76
6.1.1	Resultados da Simulação	76
6.1.2	Resultados do ensaio experimental.....	77
6.2	Estampagem em duas operações com almofada.....	79
6.2.1	Resultados da Simulação	79
6.2.2	Resultados do Ensaio	80
6.2.3	Conclusões	81
7	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	82
8	Referências e Bibliografia.....	84
	Anexo A - Tolerâncias da peça apresentada no capítulo 4.....	85
	Anexo B - Norma de Marcação do grupo PSA.....	87
	Anexo C - Norma do Porta Caracteres Tipo T	89

Índice de Imagens

Figura 1.1- Fachada da Gestamp Aveiro, SA [1].....	1
Figura 1.2 - Planta da Gestamp Aveiro, SA [1].....	2
Figura 1.3 - Clientes da Gestamp [1].....	2
Figura 2.1- Esquema de uma operação de corte [2].....	6
Figura 2.2 - Folgas entre punção e matriz [2].....	6
Figura 2.3 - Operação de dobragem [2].....	7
Figura 2.4 - Operação de curvado [2].....	7
Figura 2.5 - Deformação no plano da chapa em função dos modos de deformação [6].....	8
Figura 2.6 - Principais modos de deformação [6].....	9
Figura 2.7 - Prensa mecânica de duplo montante	10
Figura 2.8 - Representação esquemática da lubrificação limite [5].....	15
Figura 2.9 - Estrutura com colunas e pisador [9].....	17
Figura 2.10 - Elementos de guiamento [9]	17
Figura 2.11- Punções normalizados [9]	18
Figura 2.12 - Elastómeros[9]	18
Figura 2.13 - Molas Helicoidais [9].....	18
Figura 2.14 - Molas a gás [9].....	18
Figura 2.15 - Carro deslizante [9].....	19
Figura 2.16 - Carro aéreo [9]	19
Figura 2.17 - Recolha de provetes da chapa	20
Figura 2.18 - Deformações ao longo do provete.....	21
Figura 3.1- Relação custo/tempo das etapas da concepção de uma ferramenta de estampagem, sem a existência de simulação numérica [10].....	23
Figura 3.2 - Relação custo/tempo das etapas da concepção de uma ferramenta de estampagem, já com o uso da simulação numérica [10].....	24
Figura 4.1- 2D do componente em estudo	27
Figura 4.2 - Vista Isométrica da Peça	28
Figura 4.3 - Ângulo entre aba e face lateral (contra-saída – 88.69°)	28
Figura 4.4 - Condições físicas de controlo original da peça.....	29
Figura 4.5 - Sequência das etapas de realização do componente	31
Figura 4.6 - Robot de transfer utilizado na alimentação de uma ferramenta da Gestamp Portugal	31

Figura 4.7- Representação Esquemática 2D da primeira operação	32
Figura 4.8 - 3D da peça após a primeira operação.....	32
Figura 4.9 - Componentes da operação de corte de uma ferramenta da Gestamp Aveiro.....	32
Figura 4.10 - Casquilho usado para guiamento das colunas guia da ferramenta.....	33
Figura 4.11- Elemento de guiamento de punções com cargas descentradas	33
Figura 4.12 - Punções de marcação	34
Figura 4.13 - Peça realizada com punção de marcação	34
Figura 4.14- 3D da peça após a segunda operação	35
Figura 4.15- Representação Esquemática 2D da segunda operação.....	35
Figura 4.16 - Representação Esquemática 2D da terceira operação.....	36
Figura 4.17 - 3D da peça após terceira operação	36
Figura 4.18 - Esquema dos principais componentes da terceira operação	37
Figura 4.19 - Esquema da terceira operação.....	37
Figura 4.20 - 3D da peça após quarta operação	38
Figura 4.21 - Representação esquemática 2D da quarta operação	38
Figura 4.22 - Antes e Depois da quarta operação	39
Figura 4.23 - Ângulo entre face lateral e face de topo (86.72°).....	39
Figura 4.24 - Representação esquemática 2D da quinta operação	40
Figura 4.25 - Planificação da peça e dimensões de chapa necessárias	41
Figura 4.26 - Peça a planificar	41
Figura 4.27 - Geometria Introduzida para a simulação da segunda operação	42
Figura 4.28 - Matriz utilizada na simulação da segunda operação	43
Figura 4.29 - Matriz da segunda operação (Projecto).....	43
Figura 4.30 - Cerra-chapas da simulação da segunda operação	44
Figura 4.31 - Punções da simulação da segunda operação	44
Figura 4.32 - Menu de escolha do tipo de simulação	45
Figura 4.33 - Características do material retirado da base de dados do programa	46
Figura 4.34 - Visualização do decorrer da simulação da segunda operação	47
Figura 4.35 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas.....	47
Figura 4.36 - Pormenor das Janelas	47
Figura 4.37 – Zoom da figura 4.37 (Esforço máximo da matriz da segunda operação).....	48
Figura 4.38 - Esforço dos componentes da segunda operação	48
Figura 4.39 - Desvios obtidos para as iterações realizadas na operação de <i>trim</i>	49

Figura 4.40 - Geometria da terceira operação da ferramenta.....	50
Figura 4.41 - Componentes da ferramenta da simulação da terceira operação	51
Figura 4.42 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas, após a terceira operação	52
Figura 4.43 - Desvios obtidos para as iterações realizadas na primeira operação de <i>trim</i>	52
Figura 4.44 - Desvios obtidos para as iterações realizadas na segunda operação de <i>trim</i>	53
Figura 4.45 - Planificado da peça após a primeira operação	54
Figura 4.46 - Esforço de Corte da primeira operação	54
Figura 4.47 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas. após a segunda operação	55
Figura 4.48 - Esforço Necessário à deformação	56
Figura 4.49 - Esforço de Corte na segunda operação	56
Figura 4.50 - Detalhe do aumento do espaço da matriz para a janela devido à pré-dobragem	57
Figura 4.51- Chapa pousada na almofada.....	57
Figura 4.52 - Defeito na aba da janela	58
Figura 4.53 - Sequência de deformação da aba da janela	58
Figura 4.54 - Addendum simulado	59
Figura 4.55 - Addendum Real.....	59
Figura 4.56 - Resultado da solução da redução do ângulo da pré-dobragem	60
Figura 4.57 - Postiço de Calibração	60
Figura 4.58 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas, após as simulações	61
Figura 4.59 - Esforço de molas da segunda solução.....	61
Figura 4.60 - Esforço de molas da primeira solução	61
Figura 4.61- Sequência do processo da quarta operação	62
Figura 4.62 - Peça após simulação da quarta operação	63
Figura 4.63 - Retorno Elástico da peça.....	63
Figura 4.64 - Esforços de corte da quinta operação.....	64
Figura 4.65 - Modificação exigida pelo cliente final.....	65
Figura 4.66 - Almofada existente	65
Figura 4.67 - Almofada necessária para efectuar alteração	65
Figura 4.68 - Qualidade superficial da peça	66
Figura 4.69 - Enrugamento observado após a realização dos novos embutidos na almofada	66
Figura 4.70 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas, após primeiras estampagens na almofada	67

Figura 4.71 - Força de molas necessária.....	67
Figura 4.72 - Espessuras obtidas nos novos embutidos.....	68
Figura 4.73 - Proposta Gestamp Aveiro	68
Figura 4.74 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas da peça proposta pela Gestamp Aveiro	69
Figura 4.75 - Espessuras obtidas na proposta de modificação.....	69
Figura 5.1 - Peça 914+915	70
Figura 5.2 - Punção utilizado na opção das peças ligadas por uma superfície longitudinal.....	71
Figura 5.3 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas	72
Figura 5.4 - Punção utilizado na opção das peças ligadas por uma superfície transversal.....	72
Figura 6.1 - Desenho 3D da peça.....	75
Figura 6.2 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas	76
Figura 6.3 - Medição de espessuras da peça.....	77
Figura 6.4 - Punção do ensaio experimental.....	77
Figura 6.5 - Matriz do ensaio experimental	77
Figura 6.6 - Peça obtida no ensaio	78
Figura 6.7 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas	79
Figura 6.8 - Medição de espessuras da peça.....	80
Figura 6.9 - Peça obtida no ensaio	80

1 Introdução

1.1 Apresentação da Gestamp Aveiro, SA

A Gestamp Aveiro, SA está inserida no grupo multinacional espanhol Corporación Gestamp, na sua divisão automóvel Gestamp Automoción, presente em 18 países com 68 empresas e 13 centros de investigação e desenvolvimento (I&D)[1].

Fundada em 1988 com a designação “Tavol, Indústria de Acessórios de Automóveis, Lda” iniciou a actividade de fabrico de componentes metálicos para a indústria automóvel nesse mesmo ano.

Em 2001 ocorre a aquisição da Tavol pelo grupo Gestamp Automoción passando a denominar-se Gestamp Aveiro, SA.



Figura 1.1- Fachada da Gestamp Aveiro, SA [1]

A empresa está dividida em seis espaços físicos. A Logística (1 da figura 1.2), que conta com uma área coberta de 4.560 m².

A I&D (2), que centra a sua actividade na investigação e desenvolvimento de produtos e processos de fabricação, esta equipa colabora directamente com outros centros I&D tanto do grupo Gestamp Automoción como também dos principais fabricantes automóveis.

A Soldadura (3), onde são utilizados dois processos, a soldadura por pontos (resistência) e soldadura MIG/MAG, os equipamentos variam de dimensões e complexidade e estão distribuídos numa área de 5.100 m² onde 40% de um total de 90 postos de trabalho são células robotizadas.

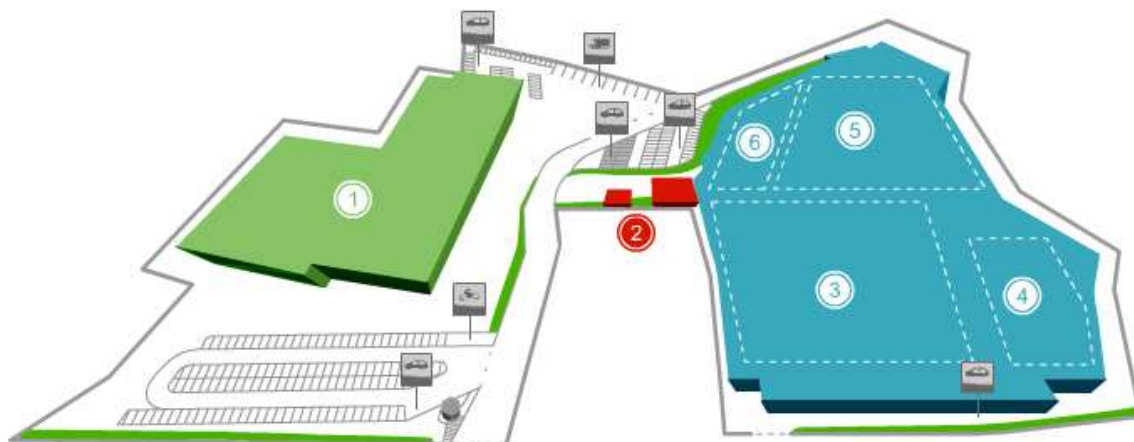


Figura 1.2 - Planta da Gestamp Aveiro, SA [1]

A Pintura (4), inserida numa área de 1.100 m², é um processo automatizado em linha que possui essencialmente as fases de pré-tratamento, pintura, secagem e polimerização.

A Estampagem (5), sector equipado com prensas mecânicas e hidráulicas, dedicadas a processos progressivos e transfers, que vão desde as 100 às 1250 Toneladas estão distribuídas numa área total coberta de 5.600 m².

A Ferramentaria (6), com uma área total de 950 m², dá capacidade interna de concepção e construção de ferramentas permitindo manter a garantia da qualidade nos processos de estampagem e atribuir uma vantagem competitiva na capacidade de resposta nas necessidades do cliente.

Os produtos finais são maioritariamente componentes de reforço estrutural, sistemas de impacto, crossmembers, componentes de eixos, componentes de chassis e pedaleiras.



Figura 1.3 - Clientes da Gestamp [1]

1.2 O Projecto na Gestamp Aveiro, SA

O projecto “Desenvolvimento e Concepção de Ferramentas de Estampar” tem como principal objectivo o acompanhamento das fases de construção de uma ferramenta de estampagem, desde a sua fase inicial. Pretende-se que este acompanhamento seja feito de uma forma crítica e construtiva com o intuito de dar um contributo directo na construção da ferramenta.

O projecto está inserido no Departamento de Construção de Ferramentas (DCF) da Gestamp Aveiro, SA. Por aqui passam todas as fases de construção das ferramentas, desde o estudo da

peça, orçamentação, projecto, materiais, equipamentos, construção, amostras e controlo de qualidade.

O estudo inicial da peça, é a primeira etapa da construção da ferramenta e começa quando um cliente envia o projecto da peça que pretende ver produzida. É então feito um estudo prévio pelos projectistas de como será em termos genéricos a ferramenta e se existe capacidade para a produzir. Complementarmente com isto é realizado um orçamento que vai determinar o custo de produção da ferramenta e o preço a apresentar ao cliente

Uma vez adjudicada a ferramenta inicia-se a fase de projecto, onde tudo é projectado ao pormenor seguindo as exigências do cliente.

À medida que o projecto vai sendo validado para execução começam a ser maquinados os componentes únicos e encomendados os normalizados.

Terminada a construção da ferramenta passa-se à fase de amostras que se destinam a obter a aprovação do cliente.

Para além do controlo final das amostras enviadas ao cliente, é constante ao longo do processo de construção da ferramenta, o controlo rigoroso exercido sobre os componentes da ferramenta.

Devido à proximidade física com o Departamento de Manutenção de Ferramentas (DMF), é possível também acompanhar a manutenção de ferramentas. Este contacto permite uma melhor interpretação de algumas soluções, nomeadamente na fase de projecto, já que muitas decisões são tomadas com base nas observações e nos conhecimentos adquiridos, tendo em conta as posteriores necessidades de manutenção a realizar nas ferramentas.

1.3 O trabalho desenvolvido na Gestamp Aveiro, SA

Um projecto deste tipo não seria possível de executar sem que inicialmente houvesse um período de ambientação. A adaptação consistiu em passar em detalhe por toda a empresa no sentido de compreender o seu funcionamento e conhecer a sua estrutura ao mesmo tempo que permitia também uma interiorização dos conceitos e terminologias utilizadas. Nesse sentido a participação nas reuniões de planeamento do departamento foram uma constante, não só nesta fase do projecto como ao longo de toda a sua duração.

No sentido de uma colaboração directa e útil ao departamento, definiu-se de seguida como objectivo, a compreensão do software de simulação numérica já existente na empresa, o “AutoForm”, permitindo assim *a posteriori* o apoio aos projectistas. Esta fase sofreu um atraso considerável devido a problemas na entrega e instalação da nova versão do software.

Para colmatar esta situação foram-se elaborando estudos de soluções construtivas de componentes, assim como a introdução de novos tipos de componentes normalizados. Este tipo de estudo teve a sua continuidade ao longo de todo o estágio.

Iniciou-se uma fase autodidacta de aprendizagem do software, que passou pela leitura e interpretação de um manual de treino, elaborado pela AutoForm, onde eram apresentadas as variadas capacidades do programa e de como interpretar os resultados obtidos. Para consolidação dos conhecimentos adquiridos, seguiu-se a realização de um Workshop, com a

utilização de um manual e um CD fornecidos pela AutoForm, no qual se explicava e mostrava de forma didáctica o modo de funcionamento do programa.

Após esta fase de compreensão e domínio do programa, começaram a ser feitas pequenas simulações para estudos iniciais de diversas peças. A par destes pequenos trabalhos que não permitiam uma exploração interessante do ponto de vista académico, foi decidido fazer um estudo mais aprofundado de um dos projectos em fase de iniciação de projecto, de um componente pertencente à PSA Peugeot Citroën.

Ao longo de todo o estágio desenvolveram-se vários estudos de diferentes peças que permitiram uma evolução considerável tanto nos conhecimentos do software como, e sobretudo na área da estampagem.

1.4 Organização do Relatório

O presente relatório está dividido em sete partes.

A fase inicial consiste de uma apresentação da empresa Gestamp Aveiro, SA, na qual foi realizado este projecto, assim como uma descrição do trabalho pretendido e realizado.

Seguidamente são apresentados os conceitos básicos da estampagem, onde se aborda o tipo de operações que usualmente se realizam, a maquinaria utilizada, os diversos conceitos de concepção de ferramentas e componentes normalizados mais utilizados.

No terceiro capítulo, é abordado o uso da simulação numérica no apoio à construção de ferramentas assim como se referem alguns aspectos importantes sobre as simulações.

O quarto e quinto capítulos apresentam o trabalho realizado em dois casos práticos distintos. O primeiro mostra o trabalho realizado no apoio a aspectos construtivos da ferramenta enquanto que no segundo o trabalho desenvolvido ocorre na fase de pré-estudo no sentido de definição do processo de embutidura da peça.

No sexto capítulo apresenta-se um estudo de validação de resultados, comparando-se os resultados de um caso prático e as correspondentes simulações.

No ultimo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e sugeridos temas a desenvolver numa eventual continuidade deste projecto.

2 Fundamentos da conformação plástica de chapas

2.1 Introdução

A estampagem consiste na realização de um conjunto de operações, através da deformação plástica, com as quais submetemos uma chapa metálica plana a uma ou mais transformações, com o objectivo de obter uma peça, com uma superfície não planificável, que possua uma forma geométrica própria, seja esta plana ou oca. As peças de forma mais ou menos complexa e irregular, mas que apresentam a característica de estar constituídas de material com espessuras quase uniforme, podem obter-se mediante uma sucessão de estampagens.

As operações do estampado da chapa dividem-se em:

- 1) Cortar
- 2) Dobrar
- 3) Embutir

Estas operações são realizadas por meio de dispositivos chamados matrizes ou cunhos, em máquinas designadas vulgarmente por prensas.

O ciclo de estampagem, que envolve uma sucessão ordenada de operações tecnológicas que transformam parte de uma chapa plana numa peça com uma forma definida, depende de vários factores, que se descrevem de seguida.

- 1º) *A forma da peça a obter* impõe, de um modo geral, um certo número de operações directamente proporcional à complexidade da sua forma. Isto é, quanto mais simples é a forma de uma peça oca, mais pequeno é o número de operações necessárias para obtê-la.
- 2º) *As dimensões da peça* influenciam igualmente o número de operações necessárias. Quanto mais profunda é uma peça relativamente ao seu diâmetro, mais operações de estampagem são necessárias.
- 3º) *A qualidade do material da chapa a trabalhar* influencia também no número de operações para obter a peça. Um disco de uma determinada chapa que admita um embutido profundo permite a obtenção de uma peça com menos operações do que se for produzida com uma chapa de igual espessura e menor plasticidade, pois esta admitirá um embutido menos profundo.

Para efeitos da definição do ciclo de estampagem, estes factores tem que ser considerados todos ao mesmo tempo, ainda que não exista uma relação entre eles.

Estes três factores influenciam não só a complexidade e dimensão das ferramentas de estampagem mas também o tipo de prensas a utilizar.

A espessura e a qualidade da chapa determinam se o processo de estampagem a utilizar é a frio ou a quente, pelo que estas considerações térmicas devem ser tidas em linha de conta na fase de definição do processo.

Na fase de estudo das matrizes de estampar devem adoptar-se métodos de trabalho simples e eficazes com os quais se possam obter o máximo rendimento com o mínimo de operações. No

entanto, muitas vezes, segundo a forma e o tipo de peça a obter é oportuno aumentar o número de operações de trabalho com outras operações intermédias [2, 3].

2.2 Corte

O corte é uma operação mecânica com a qual, utilizando ferramentas especiais apropriadas, se consegue separar uma parte metálica de outra obtendo-se instantaneamente uma determinada figura.

Esta operação está ligada a fenómenos de conformação plástica.

Numa primeira fase o punção, no seu movimento contra a matriz, exerce pressão sobre a chapa, comprimindo-a. Esta compressão dá lugar à deformação plástica do material que se encontra entre o punção e a matriz, originando uma ligeira concavidade. No entanto, com a continuação do movimento do punção ocorre uma transformação do meio plástico correspondente a uma expansão lateral. De seguida, num determinado instante o esforço de compressão vai ser igual ao de corte e bruscamente o pedaço de material sob o punção separa-se do resto caindo para o fundo da matriz (Figura 2.1).

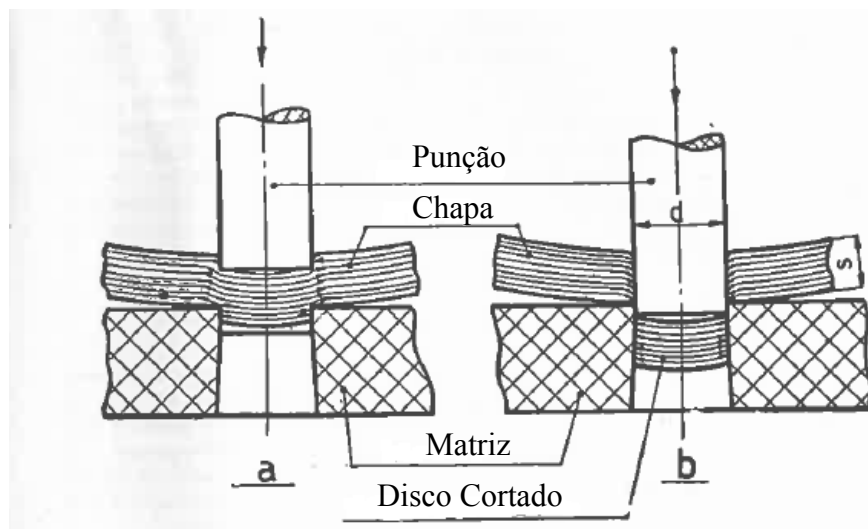


Figura 2.1- Esquema de uma operação de corte [2]

Devido à elasticidade do material têm lugar reacções internas nas fibras cortadas, deformadas pela operação que produzem arrastamento das paredes de deslizamento e originam deformações, rugosidades e rebarbas nos bordos. Para minimizar estes defeitos, são utilizadas algumas técnicas na concepção das ferramentas, nomeadamente a incorporação de um pisador actuado por molas, e a utilização de folgas adequadas entre punções e matrizes (Figura 2.2).

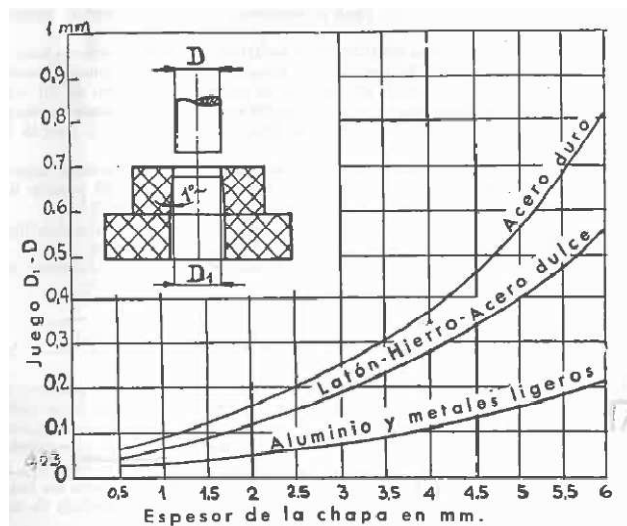


Figura 2.2 - Folgas entre punção e matriz [2]

Dependendo das tolerâncias e das qualidades superficiais exigidas no projecto da peça tal pode obrigar a operações posteriores de calibragem, rebarbagem, rectificação, ou outro processo de acabamento [2, 3].

2.3 Dobragem

As operações de dobrar e curvar ocupam um lugar importante no ciclo produtivo da estampagem, já que muitas peças, depois de sofrerem a primeira operação de corte, ou mesmo antes de qualquer operação, são submetidas a uma ou várias operações deste tipo.

Durante estas operações, é necessário evitar que a chapa sofra um alargamento, pois caso aconteça, significa uma variação da espessura da chapa. Estas operações consistem, em variar a forma de uma peça de chapa sem alterar a sua espessura, para que todas as secções permaneçam constantes.

Para que não se originem variações de espessura é necessário um estudo racional das ferramentas. Na produção de grandes séries e em caso de que um elemento deva sofrer várias operações, será necessário estudar as fases que podem ser resolvidas por operações múltiplas.

A dobragem é a operação mais simples depois do corte.

Com esta operação conseguem-se obter muito bons resultados em construções mecânicas sempre que se possam empregar uma chapa dobrada como perfil.

Neste tipo de execução devem-se ter em conta, os raios de curvatura interiores e a elasticidade do material. Estes devem ser maiores ou no mínimo iguais à espessura da chapa a dobrar com o fim de não estirar excessivamente a fibra exterior e para garantir um bom trabalho de dobragem sem rotura.

Concluída a acção de deformação que originou a dobragem, a peça tende a voltar à sua forma inicial. Este fenómeno deve-se à propriedade de elasticidade que os corpos possuem. Por este motivo, as dobragens são feitas com um ângulo mais acentuado que o pretendido para que uma vez cessada a pressão e ocorrendo o retorno elástico, a peça obtenha o ângulo desejado.

Os mesmos tipos de considerações referidos para a dobragem são também usados na operação de curvar. Esta operação distingue-se da dobragem pela sua função [2, 3].

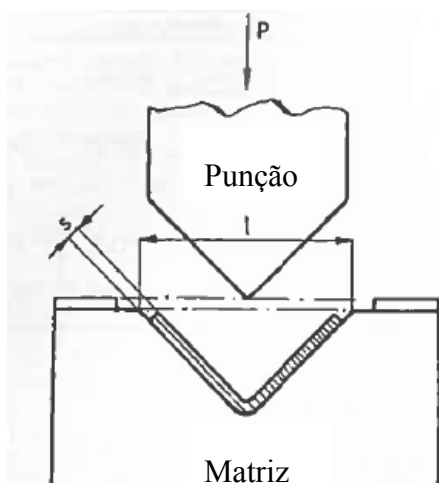


Figura 2.3 - Operação de dobragem [2]

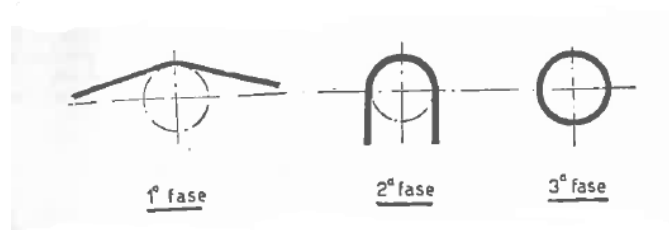


Figura 2.4 - Operação de curvado [2]

2.4 Embutidura

Este é um processo para obtenção de peças ocas, por deformação de chapas metálicas planas. De um modo geral, as peças obtidas por embutidura, os embutidos, são caracterizadas por possuírem superfícies não geradas ou não planificáveis. É esta característica que distingue a embutidura de outros processos de conformação plástica, tais como a dobra ou quinagem.

Nestas operações obriga-se a chapa plana a tomar a forma aconchegada da matriz por meio de um punção, não se devendo, teoricamente, modificar a sua espessura. Daqui se deduz que a superfície da peça produzida tem de ser equivalente à da chapa plana utilizada, o que não se verifica com exactidão na prática.

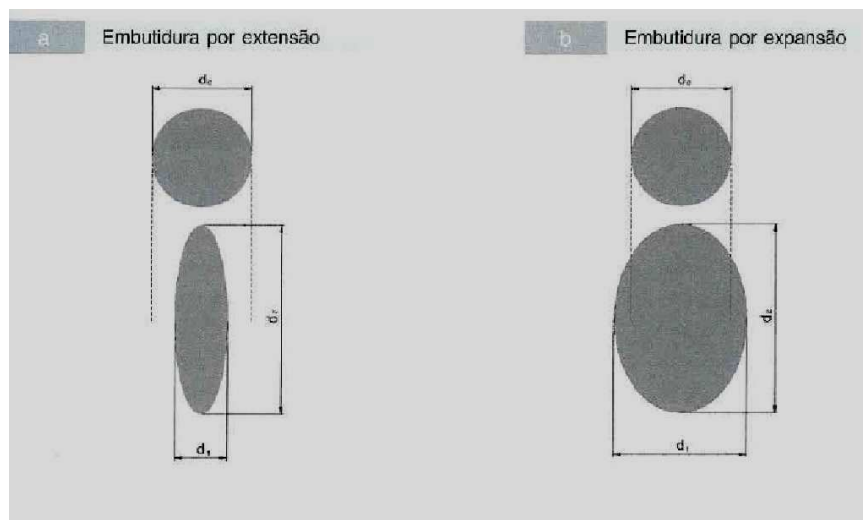
As ferramentas básicas de um processo de embutidura são classificadas em dois tipos, ferramentas de simples efeito e ferramentas de duplo efeito.

A diferença fundamental entre a ferramenta de simples efeito e a de duplo efeito reside na existência do cerra-chapas na ferramenta de duplo efeito, que é a mais utilizada [2, 3].

2.5 Modos de deformação

Existem dois tipos fundamentais de modos de deformação em embutidura:

- **Embutidura por extensão** – neste modo de deformação a chapa sofre um alongamento positivo (tracção e aumento de comprimento) numa direcção do plano da chapa e um alongamento negativo (compressão e diminuição de comprimento) na direcção perpendicular à anterior;
- **Embutidura por expansão** – neste modo de deformação a chapa sofre alongamentos positivos (tracção e aumento de comprimento) em todas as direcções do plano da chapa.



formação [6]

Os dois modos principais de deformação em embutidura dependem directamente da acção do cerra-chapas. Assim, se não existir cerra-chapas ou a pressão deste for insuficiente, o modo de deformação é, fundamentalmente, por extensão, figura 2.15 a). Se a pressão do cerra-chapas for suficientemente elevada de modo a impedir o deslizamento da chapa entre a matriz e o cerra-chapas, o modo de deformação é, fundamentalmente, por expansão, figura 2.15 b). Para conseguir o efeito de bloqueamento, é vulgar utilizar-se, para além de uma pressão do cerra-chapas, saliências na matriz ou no cerra-chapas, designados freios, que podem restringir ou impedir o deslizamento da chapa.

Os dois modos de deformação em embutidura descritos anteriormente têm uma influência determinante na espessura final do produto obtido. Assim, na deformação em expansão a espessura final da peça (figura 2.16 b)) é, necessariamente, inferior à chapa que lhe deu origem.

Na deformação por extensão, como geralmente é o caso das paredes laterais e do fundo do embutido cilíndrico, a espessura destas zonas é igual à espessura inicial da chapa, enquanto que na gola, devido às tensões de compressão existentes na zona, a espessura da chapa tende a aumentar (figura 2.16 a)) [7].

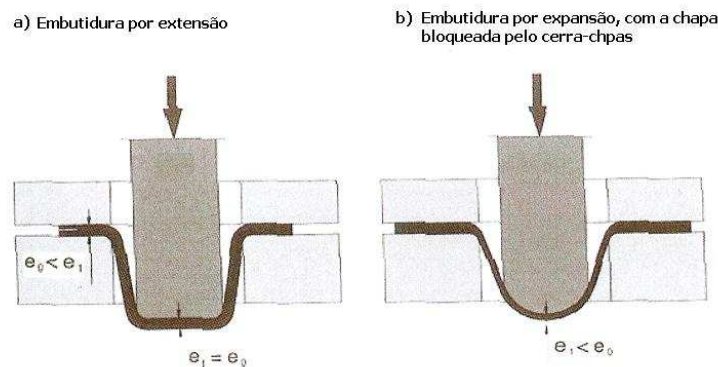


Figura 2.6 - Principais modos de deformação [6]

2.6 Pressas

Uma prensa é uma máquina-ferramenta capaz de fornecer a uma ferramenta a força e a energia necessárias à conformação por deformação plástica de um elemento de chapa plana para obter uma peça com uma forma determinada, que se designa por embutido.

Uma prensa é definida principalmente pela sua força nominal que é utilizada para o cálculo da rigidez da sua estrutura. A força nominal é o esforço máximo de resistência que pode opor uma ferramenta e uma chapa a conformar, sem risco de deformação da máquina. Este esforço determina a natureza das peças a produzir numa determinada prensa.

Existem prensas para trabalho a frio ou a quente. Abordaremos de seguida alguns aspectos das prensas destinadas a trabalhos a frio de chapas metálicas.

Estas prensas são constituídas essencialmente por uma estrutura e um conjunto móvel que acciona uma corrediça ou carro num movimento rectilíneo alternativo.

As prensas podem ser classificadas segundo:

- A natureza do accionamento
 - Prensas mecânicas
 - Prensas hidráulicas
- A forma da estrutura
 - Prensas de duplo montante
 - Prensas em colo de cisne
- O tipo de corredeira ou carro
 - Simples efeito
 - Duplo efeito
 - Triplo efeito



Figura 2.7 - Prensa mecânica de duplo montante

O controlo das características geométricas das prensas está previsto em normas internacionais. Estas normas especificam as tolerâncias de paralelismo entre a mesa e a corredeira, a perpendicularidade entre o eixo da corredeira e a mesa e a planicidade da mesa e da corredeira [4, 5].

2.6.1 Prensas Mecânicas

Nas prensas mecânicas o accionamento é feito por um sistema de biela-manivela, designado normalmente por excêntrico, que imprime um movimento alternativo de subida e descida da corredeira.

A energia necessária para o trabalho de conformação das chapas é fornecida por um volante de inércia accionado por um motor eléctrico.

Durante a operação o volante de inércia gira continuamente e o seu movimento é transmitido ao sistema de biela-manivela e à corredeira através de uma embraiagem, que é accionada quando se pretende o deslocamento do mesmo [4, 5].

2.6.2 Prensas Hidráulicas

Neste tipo de prensas existe um ou mais cilindros hidráulicos que fornecem a potência hidráulica necessária ao movimento de subida e descida da corredeira para o seu trabalho de conformação das chapas.

Estas prensas dispõem de um sistema hidráulico mais ou menos elaborada e de um modo geral permitem variar o caudal e a pressão de modo ajustar a velocidade e a força de trabalho, conseguindo-se uma elevada força a baixa velocidade.

Devido à sua construção simples, não existem grandes órgãos mecânicos, as prensas hidráulicas podem ser conseguidas a um baixo custo. Podem também ser construídas com várias corredeiras e vários movimentos, ou circuitos hidráulicos separados para acções independentes, resultando a sua construção muito mais simples que nas prensas mecânicas onde os mesmos efeitos são conseguidos através de mecanismos de cames ou excêntricos.

As prensas hidráulicas permitem trabalhar com cursos maiores que nas prensas mecânicas e facilmente ajustáveis, e a força pode ser constante ao longo de todo o curso.

AS prensas hidráulicas são recomendadas para trabalhos de estampagem profunda sendo pouco recomendável a sua utilização em operações de corte devido ao elevado risco de destruição do seu sistema hidráulico [4, 5].

2.6.3 Características Comuns

2.6.3.1 Estrutura

A estrutura das prensas pode ser de dois tipos: cole de cisne ou duplo montante.

As estruturas em chapa de aço maquinadas e soldadas seguidas de tratamento de estabilização por alívio de tensões substituíram praticamente as prensas com estruturas em fundição.

A dimensão de uma prensa é função das ferramentas com que vai trabalhar. A utilização de chapas obtidas por oxicorte e posteriormente soldadas tornou-se mais económica e mais flexível que a utilização de fundição [4, 5].

2.6.3.1.1 Colo de Cisne

Esta forma permite um acesso muito fácil tanto à mesa como à corredeira, e consequentemente à ferramenta montada na máquina.

As prensas em colo de cisne podem ser inclináveis até 30° para trás, o que permite a evacuação fácil das peças e dos desperdícios por gravidade.

Em carga esta estrutura deforma-se elasticamente e provoca um deslocamento angular das duas partes da ferramenta, prejudicando o seu bom funcionamento, diminuindo a sua longevidade e criando diferenças geométricas nas peças obtidas. Devido a este efeito este tipo de prensas é recomendado para utilizações com esforços até 2000KN.

Por vezes, para minimizar este problema recorre-se ao emprego de tirantes para conferir à estrutura uma maior rigidez, mas tal diminui o acesso à mesa e não resolve por completo o problema [4, 5].

2.6.3.1.2 Duplo Montante

Este tipo de prensas apresenta uma rigidez muito maior permitindo assim suportar esforços bastante maiores, ao qual se junta uma maior precisão nos guiamentos das ferramentas. No entanto a presença dos montantes reduz a acessibilidade à mesa de trabalho e à corredeira. Estas estruturas utilizam-se para esforços de estampagem superiores a 1000KN.

Estas prensas podem ser fabricadas em monobloco, quando de pequena dimensão ou em partes separadas devido às suas grandes dimensões. Estes elementos são posicionados através de cavilhas e chavetas e apertados com tirantes pré-tensionados a quente [4, 5].

2.6.3.2 Corredeira

É a parte móvel que está animada por um movimento alternativo. Pode ser em fundição ou em construção soldada, consoante a sua dimensão. A sua parte inferior é maquinada, para garantir a fixação da parte superior das ferramentas, com ranhuras em T para as ferramentas de maior dimensão, ou um simples furo central para fixação de ferramentas de menor dimensão.

A corredeira é guiada por guias que estão solidárias com a estrutura, em material polímero anti-fricção ou bronze e constantemente lubrificadas.

A maior parte das prensas que se utilizam actualmente, sejam hidráulicas ou mecânicas, utilizam uma corrediça de simples efeito, uma vez que o efeito de cerra-chapas obtido com as corrediças de duplo efeito, é conseguido com a utilização de ferramentas que usam molas e/ou cilindros a gás para o mesmo efeito. As prensas com corrediça de triplo efeito são de uso exclusivo para peças que necessitem de contra embutidos pouco profundos [4, 5].

2.7 Sistemas de alimentação

A maioria das operações de prensa pode ser automatizadas, pelo que os equipamentos de alimentação e descarga são utilizados frequentemente mesmo para séries de produção reduzida.

Podem distinguir-se dois tipos de equipamentos para alimentação de prensas:

- Equipamentos de alimentação a partir de bobines ou bandas
- Manipuladores ou robots que transportam as peças de um posto para outro, dentro da mesma prensa, ou de uma prensa para outra.

A alimentação manual, com os perigos daí decorrentes, é muitas vezes limitada às segundas operações de peças semi-acabadas.

A decisão de automatizar as operações persegue os seguintes objectivos:

- 1- Máxima segurança para o operador e para o equipamento
- 2- Elevados níveis de produtividade quer em séries grandes ou pequenas
- 3- Aumentar a qualidade dos produtos e diminuir a sucata
- 4- Reduzir os custos da peça final

A forma e a posição da peça antes e após cada operação deve ser cuidadosamente estudada para determinar a necessidade de introdução de furos, sistemas de guiamento e apoio da peça ou manter material extra para facilitar a sua movimentação e compensar as suas mudanças de geometria.

Os equipamentos de manuseamento automático podem ser agrupados em equipamentos de alimentação, equipamentos de descarga e equipamentos de transfer, dentro de uma prensa passando de uma ferramenta para outra, ou equipamentos de transferência de peças de uma prensa para outra.

A alimentação de prensas a partir de bobines é muito utilizada quando se empregam ferramentas progressivas. Ao avançar pelos diferentes estágios da ferramenta a peça permanece agarrada à banda de chapa e só é separada na última operação.

Estas linhas de alimentação são constituídas por três equipamentos base:

- Desenrolador, onde é colocada a bobine de chapa, desenrolando a chapa conforme o consumo.
- Endireitador, procede ao endireitamento da chapa, removendo as tensões à chapa e planificando-a através da passagem por conjuntos de rolos de aço dispostos adequadamente para tal, reguláveis em função das espessuras a alimentar.
- Alimentador, a cada golpe da prensa introduz a chapa dentro da ferramenta, num avanço igual ao passo da ferramenta. A alimentação realiza-se durante a fase inactiva da

ferramenta, quando a prensa se encontra a subir para o Ponto Morto Superior, imobilizando-se durante a fase de trabalho da ferramenta.

É possível adquirir os três equipamentos separados, mas as grandes velocidades de alimentação obtidas actualmente com o recurso a servomotores permitiu a sua aglutinação num único equipamento com uma enorme economia de espaço uma vez que assim não é necessário prever um buffer de chapa intermédio entre o endireitador e o alimentador. Este buffer além de obrigar a criar um fosso entre os dois equipamentos necessitava que os mesmos estivessem afastados uma distância em metros de 1,2 vezes a espessura de chapa a alimentar, chegando as linhas a ter mais de 10 metros de comprimento, contra os actuais 4 metros.

Com a utilização das linhas de alimentação de chapa o rendimento da prensa fica apenas limitado pela cadência da prensa, número de golpes por minuto, ou pela capacidade de alimentação da linha, m/min, uma vez que o passo da ferramenta irá então determinar o número de avanços possível por minuto [4, 5].

2.8 Ferramentas

A concepção das ferramentas de estampar é guiada por vários aspectos que definem até onde pode ir a sua complexidade e custos inerentes.

A dimensão da série, o tipo de material a estampar e a sua espessura, a qualidade e a fiabilidade pretendida na peça, tanto no aspecto como dimensional, bem como a sua geometria são factores sempre levados em consideração quando se trata de dar início ao projecto de uma ferramenta.

Por outro lado, factores característicos da empresa estampadora têm também que ser levados em linha de conta. A cadência pretendida e o equipamento disponível, quer ao nível de prensas quer ao nível dos sistemas de alimentação e de extracção de desperdícios, são factores importantes na definição do tipo de ferramenta a desenvolver.

Levando em consideração os factores referidos pode-se agrupar as ferramentas segundo o seu tipo em:

- **Ferramentas para trabalho peça a peça**, onde só é possível executar uma operação por cada golpe da prensa. Para cada operação necessária, para a obtenção de uma peça, tem que existir uma ferramenta. Uma vez a produção em curso é necessária a movimentação das peças de uma ferramenta para a outra até à conclusão do processo de fabrico.

- **Ferramentas progressivas**, nas quais a chapa entra em banda, com alimentação automática a partir de bobines ou manual a partir de tiras, e vai sendo alvo de sucessivas operações de corte, dobragem ou estampagem até à obtenção de uma peça terminada. Por cada golpe da prensa sai uma peça.

O avanço da alimentação da chapa é definido pelo comprimento da navalha de passo ou pelo próprio alimentador, e para evitar erros de posicionamento a ferramenta é equipada com pilotos de centramento.

- **Ferramentas transfer**, são compostas por várias ferramentas que executam individualmente uma determinada operação, e que se encontram montadas em sequência normalmente sobre uma base comum.

A alimentação da chapa pode ser feita automaticamente a partir de bobines ou a partir de formatos e a movimentação das peças de uma ferramenta para outra é realizada por sistemas transfer automáticos ou por robots, equipados com sistemas de garras mecânicas ou pneumáticos.

2.9 Extracção de Resíduos

As operações de corte produzem sucata, ou seja, pedaços de material que são separado da peça e que não são utilizados. A quantidade de sucata produzida atinge quantidades consideráveis.

É por isso necessário que estes desperdícios sejam retirados da área de trabalho de uma forma rápida e organizada para prevenir o atascamento das saídas dos desperdícios na ferramenta.

A remoção destes desperdícios deve ser optimizada de forma a afectar ao mínimo o desenrolar da produção evitando paragens e consequentes manuseamentos improdutivos que acabam por afectar o bom desempenho da empresa.

Para resolver estas situações as ferramentas são pensadas com orifícios de escoamento dos desperdícios tendo em conta as características da prensa onde vão trabalhar. As prensas podem dispor de rasgos na mesa ou entradas laterais para onde são encaminhados os desperdícios, por acção da gravidade, sendo frequentemente necessária a utilização de tapetes transportadores que os conduzem para contentores específicos ou para sistema colectores instalados no solo, por baixo das prensas.

2.10 Lubrificação

Na conformação de chapas a frio, uma parte muito considerável da energia mecânica absorvida pela deformação plástica e pelos atritos entre chapa e ferramenta é transformada em energia térmica.

Na maioria das operações de conformação metálica, devido às altas pressões e às baixas velocidades envolvidas, a lubrificação é do tipo limite.

A lubrificação limite ou fronteira é a forma mais extrema de lubrificação por filme fino em que toda a carga é suportada pelas asperezas lubrificadas por superfícies de filme a nível molecular, resultando na sua deformação plástica e desgaste. Outra definição diz que a lubrificação limite é dada em condições de velocidade de deslizamento baixo entre as superfícies e altas cargas associadas, ocorrendo então um rompimento da camada de óleo que separa as duas superfícies e elas passam a ser separadas apenas por filmes de lubrificante de dimensões moleculares.

Os lubrificantes não polares, tais como os óleos minerais, usados normalmente como fluidos lubrificantes têm uma aderência insuficiente às superfícies metálicas para poderem trabalhar em situações efectivas de lubrificação limite. Por esta razão, os lubrificantes polares, como óleos e ácidos gordurosos, sabões e ceras, são usados como lubrificantes na conformação metálica. A principal função de um lubrificante limite na estampagem é a interposição entre a chapa e a ferramenta de um filme que minimize o contacto metálico e que seja facilmente

removido. Na estampagem profunda, este filme é também da maior importância para o controle da fricção da chapa contra a matriz e ao longo do pisador ou serra chapas.

As moléculas das substâncias polares na lubrificação limite formam grupos de longas cadeias de carbono que aderem fortemente à chapa e aos componentes da ferramenta, provocando a sua orientação aproximada ao ângulo do fluxo da chapa na matriz. Esta orientação dos filmes das substâncias polares, que muitas vezes têm apenas a espessura de algumas moléculas, minimizam o contacto metálico e a fricção e retardam a deformação plástica das asperezas das superfícies e assim reduzem os riscos de gripagem.

As substâncias que apresentam propriedades de lubrificação limite em perfeita combinação são designados por lubrificantes de extrema pressão, EP. Um destes tipos de lubrificantes contém sólidos inorgânicos finamente divididos, como pigmentos ou agentes mecânicos EP, que separam fisicamente a chapa da ferramenta. A lubrificação limite de extrema pressão está representada na figura 2.6 (a). Quando sujeita a uma pressão suficientemente elevada, a camada de partículas sólidas é comprimida entre algumas asperezas e expulsa, permitindo então o contacto metálico nesses pontos, figura 2.6 (b). Para evitar o contacto entre metais nas asperezas onde as partículas de pigmento possam ser expulsas durante o processo de conformação, adicionam-se por vezes revestimentos fosfatados à chapa metálica. Além de fornecer uma camada sólida, integralmente ligada, os poros do revestimento fosfatado favorecem a retenção de lubrificante.

Um segundo tipo de lubrificantes de extrema pressão contendo agentes químicos EP, tais como cloratos, materiais orgânicos sulfurados ou fosfatados, reagem com a superfície metálica formando uma forte ligação de compostos químicos de cloro, enxofre e fósforo.

A contribuição das forças de atrito na estampagem pode representar 20 a 40% da energia total absorvida na operação. Esta acção poderá ser reduzida recorrendo à utilização de lubrificantes adequados, que vão permitir:

- Aumentar a longevidade da ferramenta, devido à diminuição do atrito e das temperaturas de trabalho.
- Maior regularidade e melhoria da qualidade na produção de peças estampadas com incidência no estado de superfície e no aspecto.
- A possibilidade de realizar peças difíceis, com formas complexas ou embutidos profundos, nas quais chapa e ferramenta são levadas a condições limite, dominando as

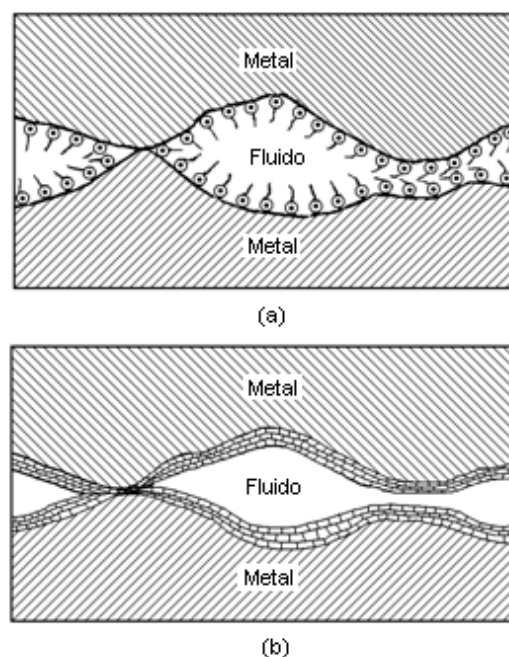


Figura 2.8 - Representação esquemática da lubrificação limite [5]

- a) Lubrificação limite com agentes oleosos
- b) Lubrificação limite a extrema pressão com um pigmento (agente mecânico EP)

condições operatórias, a geometria do planificado, a força do cerra-chapas e a velocidade de estampagem.

Além das condições que permitem obter melhores resultados na estampagem é necessário considerar as características de protecção da corrosão, o aspecto, a estabilidade do lubrificante, a facilidade de aplicação e limpeza, assim como a preparação e o armazenamento, e as suas características de higiene e toxicidade.

Não é fácil, ainda hoje, em particular para a produção de peças complexas, a escolha de lubrificantes, recorrendo-se frequentemente a testes de diferentes produtos de distintos fabricantes.

Existem actualmente dispositivos de lubrificação automática da chapa, por contacto usando rolos ou sem contacto utilizando pulverizadores, que se instalam normalmente entre o sistema de alimentação da banda de chapa e a entrada da ferramenta, permitindo um controle muito eficaz quer das quantidades de lubrificante descarregado quer da distribuição das zonas a lubrificar. Outros sistemas utilizando manipuladores ou robots entram na prensa, durante o ciclo de funcionamento, e pulverizam os distintos postos de trabalho nas ferramentas.

Para além da lubrificação da chapa em si é também importante levar em linha de conta, na fase de projecto da ferramenta, a criação de pequenos depósitos de óleo lubrificante na própria ferramenta junto de peças móveis, como punções e pisadores, de modo a garantir a sua lubrificação uma vez em movimento.

Considerando que os processos de conformação plástica dos metais envolvem o contacto entre o metal a ser conformado e as matrizes ou ferramentas de conformação, conclui-se que o atrito estará sempre presente, em maior ou menor grau.

As principais características que o atrito causa no processo são as seguintes:

- Alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão presentes durante a deformação;
- Produção de fluxos irregulares de metal (por ex: limalhas) durante o processo de conformação;
- Criação de tensões residuais no produto;
- Influência sobre a qualidade superficial (podendo ser benéfica, inclusive);
- Elevação da temperatura a níveis capazes de comprometer-lhe as propriedades mecânicas;
- Aumento do desgaste de ferramentas;
- Facilitar o “agarramento” das ferramentas de conformação com o metal a ser conformado;
- Aumento do consumo de energia necessária à deformação, diminuindo a eficiência [4, 5].

2.11 Componentes Normalizados

O atravancamento de uma ferramenta depende da sua complexidade e esta por sua vez está directamente dependente da complexidade e da dimensão de peça a estampar e do número de passos, ou operações, que se pretendam introduzir na ferramenta. Assim numa ferramenta para além dos punções e das matrizes desenhadas em função da geometria de cada peça a obter, e dos elementos de ligação mecânica utilizados, parafusos, anilhas, cavilhas, etc., existe um vasto número de componentes normalizados disponíveis no comércio da especialidade.

A gama de componentes normalizados para a construção de ferramentas inclui, entre outros:

- **Estruturas:** As placas da estrutura de uma ferramenta, base e tecto, designação comumente utilizada para as placas superior e inferior de uma ferramenta, podem ser adquiridas com geometrias normalizadas, em diferentes comprimentos, larguras e espessuras, em variantes que incluem a placa de guiamento dos punções e distintos tipos e quantidades de elementos de guiamento, conforme a sua dimensão e o tipo de trabalho a executar. Existem disponíveis estruturas em aço, ferro fundido e alumínio.

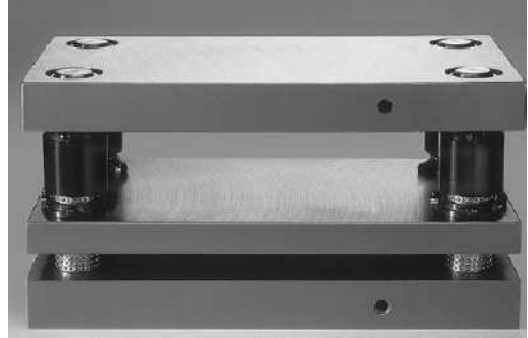


Figura 2.9 - Estrutura com colunas e pisador [9]

- **Casquilhos e colunas de guiamento:** É de extrema importância o alinhamento entre os punções e as matrizes que trabalham numa ferramenta. Só assim é possível garantir as folgas adequadas de trabalho de modo a que não surjam rebarbas ou repuxados e se assegure uma vida mais longa destes componentes.



Figura 2.10 - Elementos de guiamento [9]

Longe vão os tempos em que as ferramentarias torneavam, cementavam e rectificavam os casquilhos e as colunas das ferramentas.

A precisão e a manutenção do alinhamento dependem inteiramente da qualidade e da resistência ao desgaste dos elementos de guiamento. As exigências das peças estampadas e em consequência da recente evolução das técnicas de estampagem já não permitem tal, pois os padrões de qualidade atingidos assim o exigem.

No mercado existem soluções que vão desde o conjunto de coluna e casquilho mais convencional até conjuntos com casquilhos em ferrite sinterizada carbonitrurada, com propriedades auto lubrificantes, casquilhos revestidos a bronze, casquilhos com jaulas de esferas ou rolos para ferramentas que trabalham em prensas de alta velocidade e cargas elevadas.

- **Punções e matrizes:** Existe no mercado uma grande variedade de punções e matrizes normalizadas, para distintos tipos de montagem, com variadas formas e tamanhos, em

diferentes materiais e com vários tipos de revestimento, permitindo uma vasta gama de selecção e possibilitando ainda a sua posterior mecanização para formas individualizadas.

A sua produção em série garante elevados padrões de qualidade e precisão, com um consequente aumento do tempo de vida útil e custos de produção insuperáveis quando comparados com os meios de fabricação unitários, facilitando também as intervenções da manutenção.



Figura 2.11- Punções normalizados [9]

- **Elastómeros:** Estes componentes feitos a partir de poliuretano, com durezas entre 70 e 90 Shore A, apresentam excelentes propriedades de resistência mecânica à abrasão e aos óleos, aliado a altas resiliências.

Estes elementos são capazes de absorver e amortecer forças, tanto de impacto como constantes, fazendo com que os projectistas tirem um bom proveito da sua elasticidade aplicando-os frequentemente em substituição das molas helicoidais.



Figura 2.12 - Elastómeros[9]

- **Molas helicoidais:** Muito poucas serão as ferramentas de estampar que não possuem molas helicoidais. São um componente imprescindível no êxito de qualquer processo de estampagem pois permitem a construção de ferramentas com duplo e triplo efeito para trabalharem em prensas de simples efeito, que de outra forma teriam que funcionar em prensas de duplo ou triplo efeito, extremamente caras e com mecanismos complexos, de elevada manutenção.



Figura 2.13 - Molas Helicoidais [9]

São fabricadas, em aço de alta liga de cromo-vanádio, a frio a partir de secções redondas, quadradas ou rectangulares, e são capazes de suportar cargas de serviço extremamente elevadas ocupando um espaço mínimo.

A sua falha em serviço causa sempre paragens de produção e intervenções mais ou menos prolongadas por obrigarem frequentemente à quase completa desmontagem da parte superior ou inferior da ferramenta, onde estão montadas.

Dependendo da complexidade da ferramenta, as molas helicoidais usam-se frequentemente combinadas com elastómeros e com as molas a gás.

- **Molas a gás:** A extensa gama de molas a gás, constitui um excelente complemento aos componentes com efeito de mola, como as molas helicoidais e os elastómeros. Permitem alcançar maiores forças, com cursos maiores e praticamente aplicam força desde o início do curso de trabalho.



Figura 2.14 - Molas a gás [9]

As molas a gás são recipientes, normalmente de forma cilíndrica, com nitrogénio a uma pressão máxima de 150 bar.

- **Carros deslizantes:** Trata-se de unidades deslizantes, normalmente denominadas por carros, que podem ser equipadas com punções para operações de corte ou estampagem, em superfícies que não se encontram na horizontal, transformando o movimento vertical descendente da parte superior da ferramenta num movimento perpendicular à superfície a trabalhar.

São constituídos basicamente por um carro, que desliza num sistema de guias, possuindo um plano inclinado, ou uma came, que é activada por uma cunha montada na outra parte da estrutura da ferramenta. O retorno do carro à posição de descanso é realizado através do uso de molas helicoidais ou a gás, conforme o modelo utilizado.

Existem carros com capacidade para trabalhar com forças de estampagem até 150 kN, e são muito populares entre os projectistas de ferramentas do sector automóvel.

Apresentam baixos custos de manutenção e uma vida útil até um milhão de golpes. Consoante o tipo de guias utilizado podem permitir a aplicação de cargas descentralizadas.

- **Carros aéreos:** Ao contrário dos carros deslizantes, as unidades deslizantes estão aplicadas na parte superior da ferramenta e a cunha está fixa na base da ferramenta.

Têm como objectivo trabalhar perpendicularmente às superfícies superiores das peças que não estando na horizontal não possibilitam operações utilizando o movimento vertical da prensa.

Permitem aplicações com ângulos fixos de trabalho que podem variar dos 0 aos 75°.

Para além dos componentes já referidos existem muitos outros, como por exemplo, placas de aço tratado e rectificado para placas de choque, grampos de aperto, olhais de elevação e transporte, etc., que permitem aumentar a produtividade de um projectista ferramenteiro, uma considerável poupança nos custos de construção e prazos de entrega mais reduzidos.

Também os custos de manutenção são mais baixos uma vez que estes componentes, sendo normalizados, podem ser facilmente substituídos, total ou parcialmente, com a certeza de que quando a ferramenta voltar à prensa não são necessárias perdas de tempo para novos ajustes e afinações.

Devido à sua elevada fiabilidade, precisão e qualidade, a utilização destes componentes tem permitido atingir bons níveis de fiabilidade e disponibilidade das ferramentas.



Figura 2.15 - Carro deslizante [9]

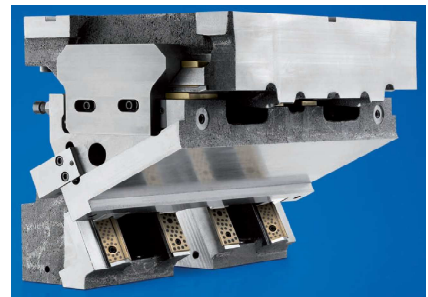


Figura 2.16 - Carro aéreo [9]

2.12 Materiais

2.12.1 Anisotropia

O comportamento anisotrópico das chapas está, geralmente, relacionado com a técnica de laminagem e com os tratamentos térmicos posteriores usados na sua produção. Sempre que ficam direcções cristalinas com orientação preferencial existirá comportamento anisotrópico do material, cujas consequências são: valores diferentes da tensão limite de elasticidade consoante a direcção da solicitação, originando portanto, deformações que dependem também da direcção em que se está a solicitar a chapa [7].

Uma característica importante apresentada pelas chapas laminadas é a anisotropia normal. Essa anisotropia é causada, principalmente, pela textura cristalográfica. Esta orientação pode ser modificada por recristalização durante o recozimento do metal. Mas, dificilmente, pode ser completamente eliminada do material. O grau de anisotropia é estritamente relacionado à estrutura cristalina do metal ou liga. Em geral, a anisotropia desenvolve-se mais fortemente em metais com estrutura hexagonal do que em metais com estrutura cúbica de corpo centrado.

Para determinar o índice de anisotropia de uma determinada chapa, deve realizar-se um ensaio de tracção em amostras retiradas na direcção de laminagem, 45° e 90° em relação a essa direcção. A figura 2.17 retrata como são retirados os provetes de uma chapa.

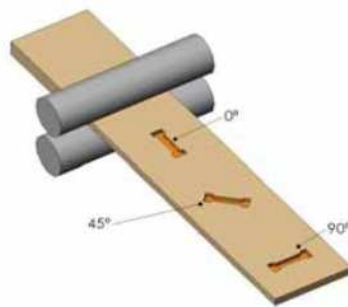


Figura 2.17 - Recolha de provetes da chapa

Uma determinada chapa pode apresentar anisotropia planar, determinada pela razão entre a deformação na largura (ε_ω) e a deformação na espessura (ε_t), descrita na seguinte expressão:

$$r = \frac{\varepsilon_\omega}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}$$

Os provetes, figura 2.18 são sujeitos a um ensaio de tracção, onde são medidas as deformações em função da tensão aplicada.

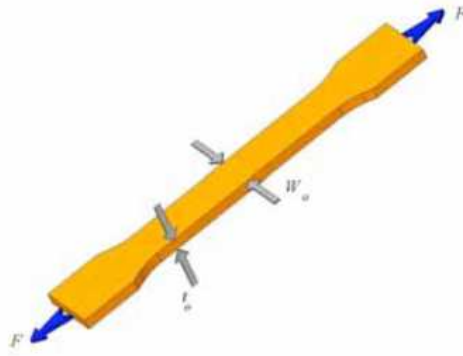


Figura 2.18 - Deformações ao longo do provete

Um material ideal para a estampagem seria aquele que apresentasse um valor de r igual ao infinito. Ou seja, a deformação ocorreria só na largura e no comprimento. As ligas de titânio comercial apresentam valores de r que variam entre 3 e 7. Já os materiais isotrópicos apresentam r igual a 1.

O valor de r , geralmente, varia com a direcção em relação à direcção de laminagem. É comum caracterizar-se um material pelo coeficiente de anisotropia normal médio, \bar{r} , descrito na seguinte expressão [8]:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

Uma outra característica importante observada em chapas laminadas é o aparecimento de “orelhas” nas bordas de copos embutidos. Este fenómeno deve-se à diferença do valor de r para cada direcção da chapa que originou o copo [7]. Cadell afirma [8] que nas direcções que apresentam um valor de r menor ocorrerá um maior engrossamento da chapa durante o processo de estampagem. Assim, a altura do copo para aquela região será menor. Os tamanhos das orelhas apresentadas e a direcção em que elas se formam estão relacionadas com o coeficiente de anisotropia planar, Δr , e pode ser definido por:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

As chapas com valores positivos de Δr formam orelhas a zero graus e a noventa graus em relação à direcção de laminagem, e as chapas com valores negativos de Δr formam orelhas a $\pm 45^\circ$. Quanto maior for o módulo de Δr , maior será o tamanho das orelhas [8].

2.12.2 Encruamento

A taxa de encruamento de um material pode ser quantificada através de coeficiente de encruamento, n , obtido a partir de diferentes modelos matemáticos. Este coeficiente não é mais do que um indicador sobre a capacidade intrínseca do material em repartir as deformações quando sujeito a um gradiente de tensão, sendo habitual em estampagem definir-se um coeficiente de encruamento médio, \bar{n} , ponderando os diferentes coeficientes de encruamento no plano da chapa, definido pela seguinte expressão:

$$\bar{n} = \frac{n_0 + n_{90} + 2n_{45}}{4}$$

Em que n_0 , n_{45} e n_{90} são respectivamente, o coeficiente de encruamento segundo a direcção de laminagem, uma direcção fazendo 45° com a laminagem e uma direcção normal a laminagem [7].

Para melhor compreender a influência do coeficiente de encruamento médio na deformação, considere-se um provete de tracção uniaxial onde se vai analisar a progressão da deformação de um modo incremental. Deste modo, um incremento da tensão aplicada irá provocar numa região localizada do provete uma redução de secção, a qual passará a funcionar como um defeito geométrico, pois a deformação passa a ter tendência a localizar-se nessa zona. No entanto, o encruamento que o material sofreu durante a deformação conduz ao aumento da tensão limite de elasticidade dessa zona, sendo esse acréscimo tanto mais elevado quanto maior for o coeficiente de encruamento. Então, sempre que a tensão associada a este último efeito superar a que resulta da secção, a deformação plástica prosseguirá numa região exterior a esta e a deformação plástica irá repartir-se globalmente pelo provete. No caso concreto da estampagem este fenómeno faz-se sentir essencialmente na zona do canto do cunho, onde o aumento do coeficiente de encruamento favorece os modos de deformação em expansão aí existentes, promovendo uma repartição mais alargada e mais homogénea das deformações, oferecendo, por isso, uma maior resistência ao aparecimento da estrição e de todos os inconvenientes que lhe são associados [7].

3 Método de Elementos Finitos na construção de ferramentas

A utilização da simulação numérica, com recurso ao Método de Elementos Finitos na representação dos fenómenos típicos do processo de estampagem para o projecto de ferramentas de estampagem tornou-se uma prática comum na indústria da conformação de chapa metálica, especialmente, em segmentos muito exigentes e que lidam com peças de maior porte ou custo, como é o caso da indústria automóvel.

Existem diversos sistemas comerciais disponíveis há já alguns anos para utilização por parte dos fabricantes de ferramentas. As tarefas de simulação são efectuadas como um complemento do trabalho dos projectistas, pessoal da ferramentaria e dos ensaios, ou ensaios, na fase de concepção e projecto detalhado da ferramenta.

O resultado tem sido uma mudança no processo de desenvolvimento das ferramentas, com a simulação numérica a tornar-se o centro do processo, isto devido a que, ajustes que eram feitos durante a etapa de construção e ensaios e problemas que eram resolvidos debaixo da prensa são agora corriqueiramente avaliados, definidos e corrigidos no ecrã do computador, com os projectistas a assumir tarefas que costumavam ser dos analistas e do pessoal da ferramentaria.

Sem dúvida que os últimos avanços dos sistemas de simulação numérica do processo de estampagem de chapas estão a modificar a forma como as ferramentas de estampagem são concebidas e fabricadas.

A figura 3.1 mostra como era normalmente organizado o processo tradicional de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem do ponto de vista de prazos e custos envolvidos.

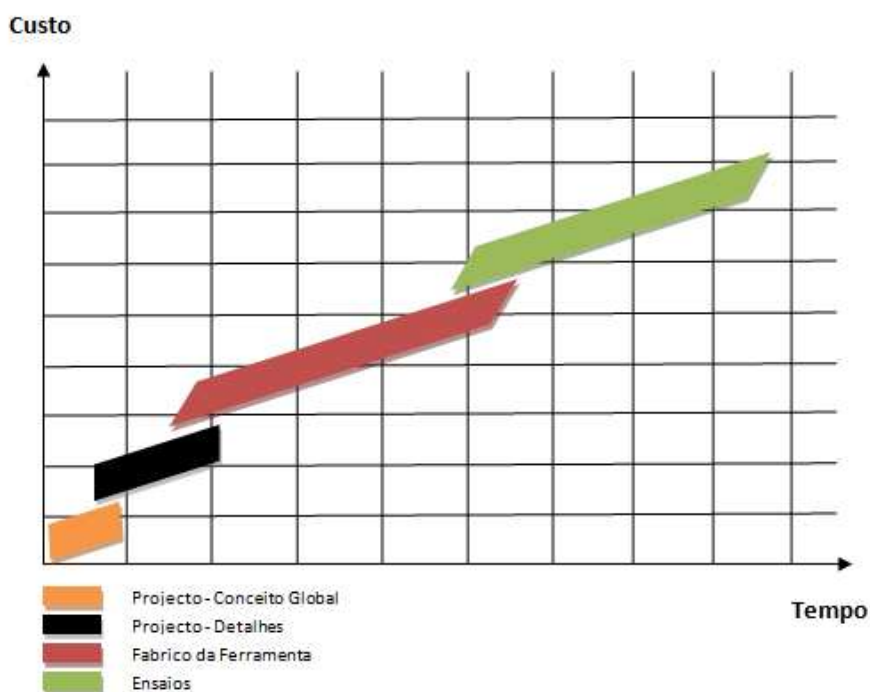


Figura 3.1- Relação custo/tempo das etapas da concepção de uma ferramenta de estampagem, sem a existência de simulação numérica [10]

Na figura 3.1 pode observar-se que os custos envolvidos em cada etapa são crescentes e acumulativos, que existe um aumento abrupto do custo entre as actividades mais “teóricas” (Projecto - Conceito Global e Projecto - Detalhes) e as mais “práticas” (Fabrico da Ferramenta e Ensaaios). Isto deve-se ao facto de que para as últimas, começam a ser envolvidas matérias-primas e uso de máquinas.

Outro ponto de realçar é de que os tempos de Fabricação e Ensaaios, são mais longos e mais difíceis de estimar que os demais. Assim, tornou-se prática comum acelerar as etapas de projecto e detalhe com o fim de o utilizar nas etapas finais. Geralmente é admissível que esta redução de tempo na etapa inicial possa prejudicar a qualidade do projecto em si, e eventuais problemas daí originados deverão ser corrigidos durante a etapa de ensaios.

Os prazos mais longos e principalmente a imprevisibilidade dos resultados dos ensaios eram considerados normais em épocas passadas, em que a forte concorrência que caracteriza a economia moderna não era tão feroz.

Uma nova realidade impulsionou a adopção nos últimos anos dos sistemas de simulação numérica do processo de estampagem. Baseados no Método dos Elementos Finitos, estes sistemas permitem a avaliação em computador dos resultados de uma determinada operação ou de um conjunto de operações de estampagem, permitindo a detecção de eventuais problemas antes mesmo de que tenha sido fabricado qualquer componente da ferramenta.

As vantagens advindas da utilização destes sistemas são evidentes, obtendo-se reduções bastante acentuadas nos tempos de ensaios minimizando os trabalhos de modificação da ferramenta já fabricada.

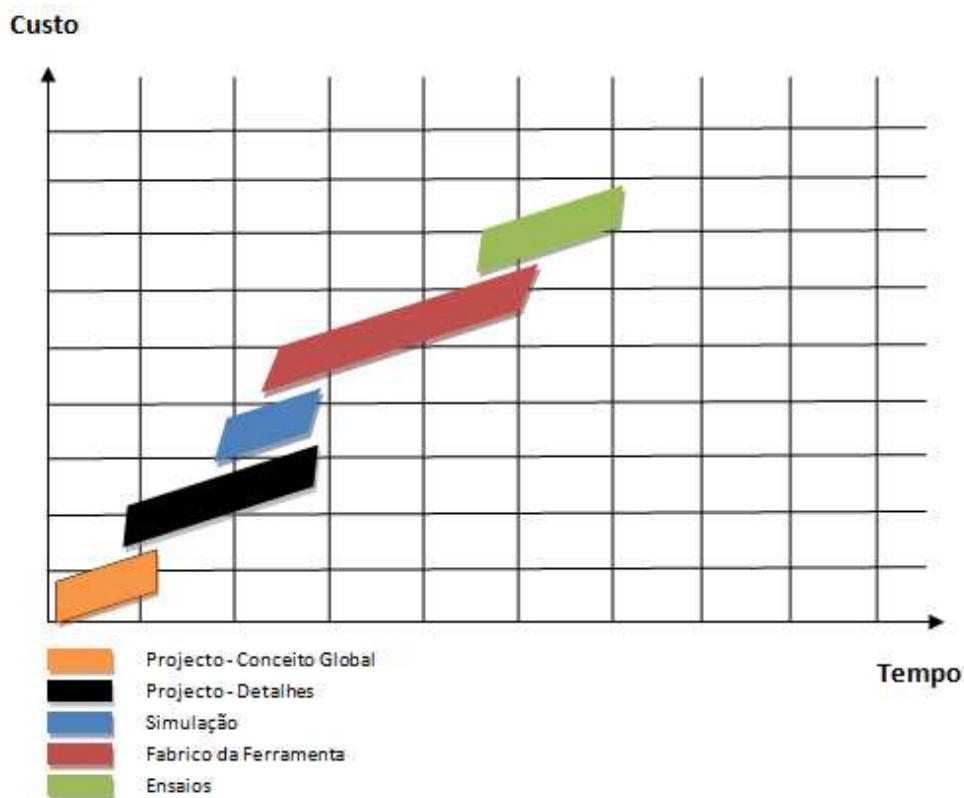


Figura 3.2 - Relação custo/tempo das etapas da concepção de uma ferramenta de estampagem, já com o uso da simulação numérica [10]

Comparando a figura 3.1 com a figura 3.2, vê-se que foi adicionada uma nova actividade, a simulação, que normalmente ocorre num período que vai desde a finalização do processo de detalhe até ao início da concepção da ferramenta. Contudo, esta não é uma regra absoluta e em muitos casos a actividade da simulação mistura-se com as fases de projecto.

A inclusão desta nova fase acarreta um aumento dos tempos de projecto pois as operações de simulação necessitam de ser modeladas em 3D e testadas. No entanto, este atraso no factor tempo é compensado pela redução nos prazos e custos dos ensaios.

A ênfase deste trabalho será nos aspectos eminentemente práticos do processo de desenvolvimento da ferramenta, do ponto de vista da organização do trabalho e não do ponto de vista teórico, ou seja, não serão discutidos detalhes técnicos das soluções em si, mas apenas os aspectos destas que afectem o processo de desenvolvimento da ferramenta.

3.1 Conceitos do programa de elementos finitos utilizado

O software de simulação numérica utilizado apresenta soluções para a produção de ferramentas para a indústria de conformação de chapa. O uso deste software melhora as condições de planificação da ferramenta, reduz o número e o tempo dos ensaios e reduz ainda os tempos de paragem e as taxas de rejeição das peças produzidas.

3.1.1 Definição da Geometria

A geometria corresponde a peça que se quer estampar e é essencial para que se possa simular. Esta geometria tem de ser fornecida ao programa sob a forma de uma superfície 3D, ou seja não podem ser fornecidos ficheiros 3D sólidos. Isto porque o factor espessura da peça é dado directamente como um parâmetro independente, não dependendo do ficheiro fornecido.

3.1.2 Concepção dos componentes da ferramenta

Atendendo a que há um forte interesse em simular pequenas operações de peças em poucos minutos e numa fase de pré-estudo em que não há ainda qualquer componente desenhado, o programa permite a criação das ferramentas de uma forma rápida, partindo apenas da superfície fornecida da peça.

Neste processo, há que dar indicação se a superfície ou skin, que foi introduzida foi retirada da parte superior ou da parte inferior da peça. Esta indicação prende-se com a necessidade do programa efectuar um offset nas ferramentas, equivalente à espessura da peça. Assim, havendo a indicação da proveniência da skin, este saberá de que forma deve alterar as dimensões das matrizes e punções.

O software permite ainda manipular a geometria, havendo a possibilidade de tapar furos e cortes existentes na peça. É ainda possível criar o “addendum” de forma automática ou manual. Após a entrada dos dados, todos os movimentos e posicionamento das ferramentas são definidos automaticamente.

Após a preparação das geometrias, resta apenas definir o formato da chapa, que pode ser importado ou criado directamente no programa através de uma forma simples como a criação de um rectângulo.

3.1.3 Definição de contorno

O processo de definição de contorno, função *trim*, é um dos mais úteis deste software. Este consiste na criação de uma linha de contorno, que tanto pode ser do exterior da peça como de um corte interior, que favorecerá uma posterior estampagem dessa zona seleccionada. As linhas de contorno assim obtidas permitem a definição do planificado da peça ou de zonas particulares em estudos.

O modo de funcionamento desta ferramenta consiste em fornecer ao programa, após uma estampagem, a linha de contorno da parte já estampada e a sua linha inicial. Ao serem linhas de contorno o próprio programa já as identifica, não sendo necessário fornecer-las por importação de ficheiros.

Com isto o programa cria um número de simulações definido pelo utilizador com diferentes linhas de contorno. Ao programa é dado uma tolerância de desvio máxima e um número de simulações máximas a realizar. O programa criará um n número de simulações com diferentes linhas de contorno até atingir o número máximo de simulações ou uma linha que apresente um valor igual ou inferior ao desvio definido.

É possível depois exportar qualquer destas linhas em ficheiro IGS para utilizar em softwares de desenho, como por exemplo o AutoCad.

3.1.4 Resultados fundamentais a considerar

Um aspecto importante de qualquer software de simulação, é a capacidade de fornecer informação ao utilizador.

Uma das informações mais utilizadas e que mais rapidamente fornece ao utilizador uma ideia geral, mas bastante completa da peça, é a análise de formabilidade. Esta informação é dada de uma forma gráfica representada sobre a peça, permite a identificação das zonas sujeitas a rugas, a compressões, em risco de fissura, em fissura, e aquelas que se deformaram de uma forma segura.

De uma forma gráfica, recorrendo a outra ferramenta, através de um gradiente de cores aplicado sobre a peça, são indicadas também as áreas da peça mais sujeitas a sofrer enrugamento.

Precisa e útil é a capacidade de definir a espessura obtida em qualquer ponto da peça. Esta informação permite ao utilizador verificar se os resultados obtidos estão dentro dos valores admitidos para a espessura mínima e máxima imposta pelo cliente.

Outra informação fornecida ao utilizador através de valores concretos é o retorno elástico da peça, que pode estar quantificado em milímetros (linear) ou em graus (angular).

4 Uso do Método dos Elementos Finitos no projecto de uma ferramenta de estampar

Este capítulo regista as etapas realizadas na elaboração do projecto de uma ferramenta de estampar destinada à produção de um determinado componente para posterior montagem, por soldadura, na carroçaria de um automóvel.

À semelhança da terminologia técnica usada na Empresa, utiliza-se o termo “peça” como designação do componente a fabricar, para não originar qualquer possível confusão quando são referidos componentes que constituem a ferramenta.

4.1 Apresentação da peça estampada

Uma das características da indústria automóvel é a sua alta competitividade entre as diversas marcas, o que leva a um forte secretismo na fase de desenvolvimento de cada produto. Por isso, não é admirar que a informação fornecida pelos construtores aos seus fornecedores seja a mínima indispensável para a realização das encomendas, e que a informação existente quanto à aplicação deste componente seja mínima. Ainda assim sabe-se que este componente está posicionado na zona de ligação dos bancos da frente ao chassis do carro.

Esta peça será produzida, pelo cliente, Gestamp Portugal Lda, para um fabricante de automóveis europeu.

Como é possível ver pela figura 4.1, esta peça apresenta umas dimensões gerais consideráveis, o que adivinha um esforço elevado no seu processo, assim como uma dimensão considerável para a ferramenta, visto que se pretende estampar simultaneamente uma peça esquerda e uma direita.

Uma outra informação da máxima importância sobre a peça é a espessura da chapa a utilizar, neste caso 1,17 mm.

O ficheiro da peça é fornecido em formato 3D uma vez que um formato a 2D perde muita informação não permitindo uma visão completa e adequada da peça. Isto permite que se possa ver a peça de qualquer ângulo e com qualquer ampliação eliminando assim qualquer dúvida que por vezes surge aquando de um desenho 2D muito pormenorizado e sobrecarregado de linhas. Para além disso, na realização das simulações o 3D é indispensável.

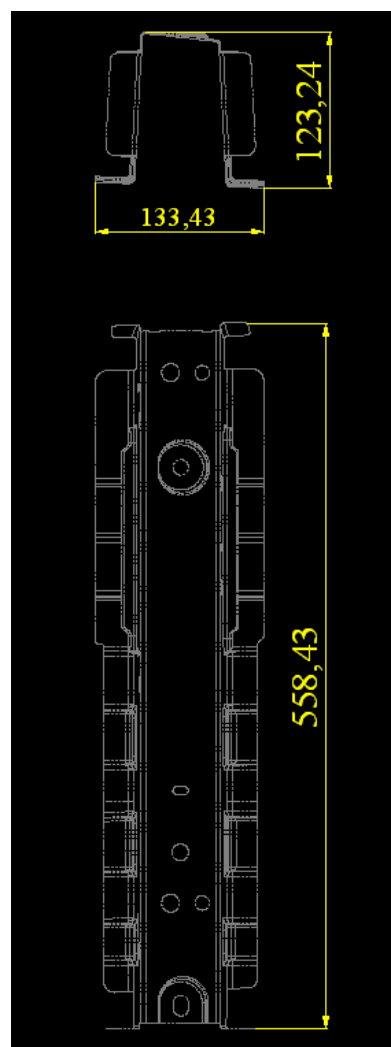
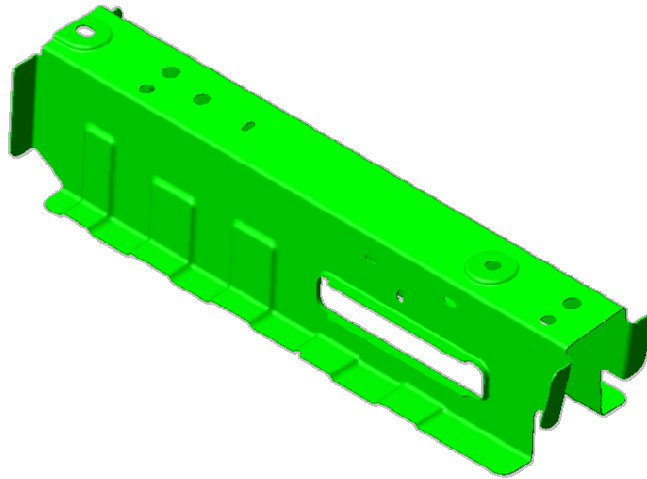
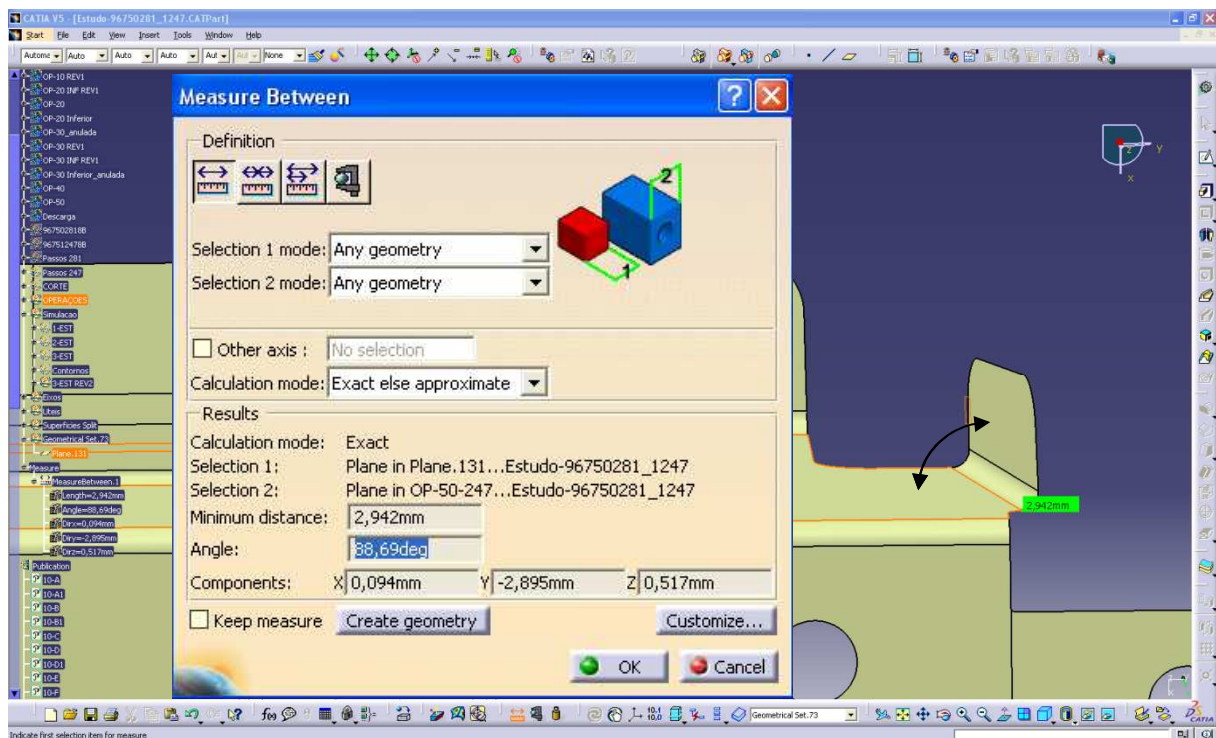


Figura 4.1- 2D do componente em estudo



Como principal pormenor não perceptível da peça na imagem a 2D está a contra-saída de uma das abas dos topos, apresentada na figura 4.3.



Pode-se verificar a existência de uma aba negativa, isto é, para a realização da aba por estampagem esta não pode ser obtida por uma simples e comum dobragem pois necessita um ângulo superior a 90° , resultando numa contra-saída, considerando não só o ângulo pretendido como também o retorno elástico.

4.1.1 Condições Físicas de Controlo (CPC)

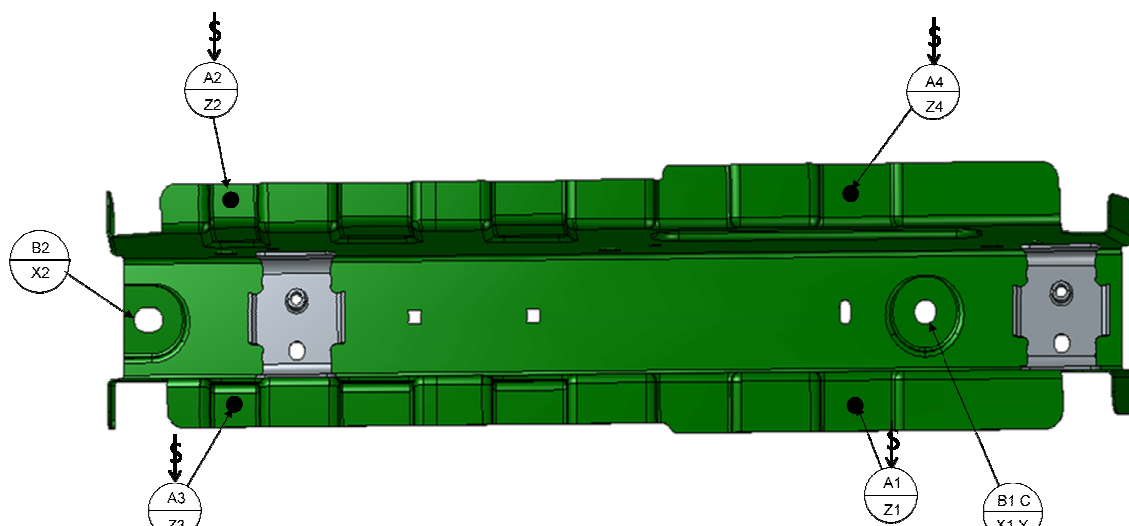
Um conjunto de indicações fornecido sempre pelo cliente é o chamado Condições Físicas de Controlo (CPC, do francês, Conditions Physiques de Control). Estas indicações apresentam de que forma os graus de liberdade da peça devem ser bloqueados. Estas indicações são essenciais na criação da maquete de controlo da peça.

Como se vê pela figura 4.4, na peça em estudo são considerados dois furos e quatro superfícies. O furo B1 C é utilizado de forma a bloquear o movimento da peça num plano horizontal, contudo o seu uso exclusivo permite a rotação da peça sobre este, assim é também designado o ponto B2, que desta forma e em conjunto com o ponto anterior imobiliza totalmente a peça. Sendo B2 um furo oblongo, aparentemente este seria suficiente para impedir a peça tanto de se mover no plano como para impedir a rotação, contudo, na construção da maquete os pilotos utilizados são cónicos, e não possuem a dimensão exacta da forma, assim permite a que dentro das tolerâncias admissíveis qualquer variação do posicionamento do furo não inviabilize a verificação da peça.

De seguida é necessário definir em que plano a peça será assente e para isso os pontos A1, A2, A3 e A4 são dados como pontos de assentamento e neles a peça deverá ser grampeada, dada a indicação do S com a seta.

A utilização de 4 pontos para definir o plano de assentamento não é de todo invulgar. A utilização de 4 pontos grampeados, forçará a peça a deformar-se ligeiramente quando colocada na maquete, uma vez que é muito difícil que no final do processo uma peça tenha um posicionamento perfeito nos 4 pontos.

No entanto tal deve-se a questões ligadas com a montagem da peça no chassis, uma vez que aí também terá de adaptar-se à superfície da outra peça onde vai ser aplicada, ficando sujeita a tensões. Assim sendo a verificação do posicionamento de furos é feito de uma forma mais correcta.



4.1.2 Zona de Tolerâncias

As tolerâncias são dos factores mais importantes da obtenção da peça. Cada peça é única e cada aspecto, pormenor ou detalhe da peça tem uma tolerância definida, consoante a sua função e importância na montagem final.

Por norma a informação das tolerâncias gerais da peça é fornecida pelo cliente com um conjunto de indicações das tolerâncias mais específicas, que geralmente são mais apertadas que as gerais.

Estas tolerâncias, devido a dificuldades surgidas na fabricação das ferramentas, são por vezes alteradas por comum acordo entre o fabricante da ferramenta e o cliente, quando não representam um risco para a posterior utilização da peça.

No anexo A é apresentada a tabela de tolerâncias desta peça.

4.1.3 Material

A qualidade da matéria-prima a utilizar na estampagem da peça em estudo está definida segundo a norma francesa E 275 D.

Com a norma europeia S 260 NC [12], o E 275 D é um aço usado para deformações a frio para componentes das mais diversas geometrias. Os seus campos de aplicação incluem o fabrico de vigas longitudinais, quadros, peças estampadas a frio, secções laminadas a frio e tubos estruturais. Pode ainda ser deformado a quente sem alterar as suas propriedades quando usada uma escala de temperaturas entre os 850 e os 1050°C.

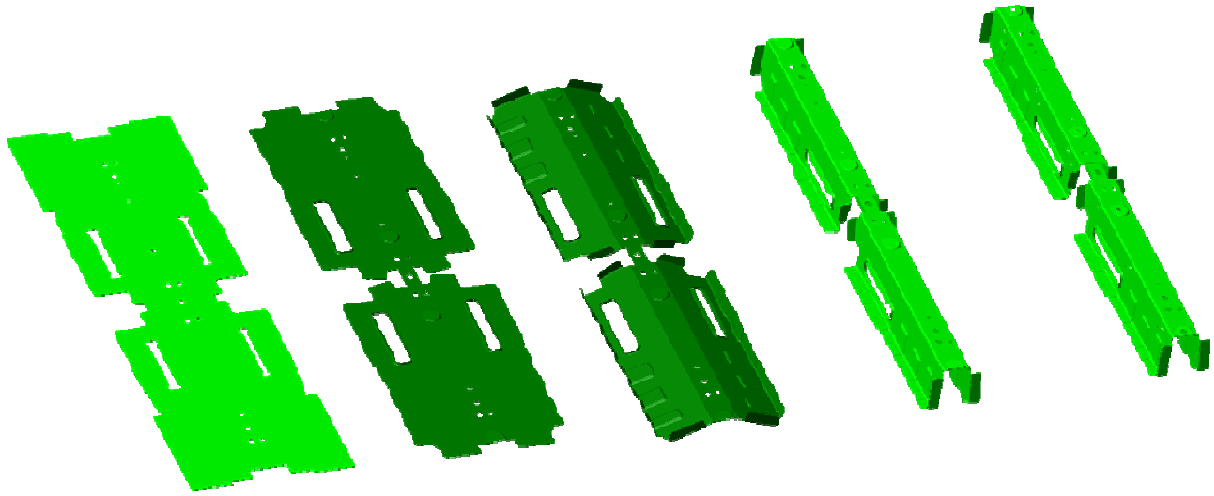
Este tipo de aço oferece excelentes capacidades para operações a frio de curvatura e dobragem tanto no sentido longitudinal como no transversal.

O tratamento térmico de normalização, entre 900 – 950°C só é necessário quando as propriedades mecânicas e tecnológicas necessitem de ser repostas, para as condições de fornecimento, quando sejam efectuadas posteriores operações de conformação a frio [11].

Este aço pode ser perfeitamente soldado tanto manualmente como automaticamente por qualquer dos processos habituais de soldadura. Contudo, a qualidade das juntas de soldadura vão depender do processo usado, das condições de soldadura e da selecção dos correctos materiais de adição [11].

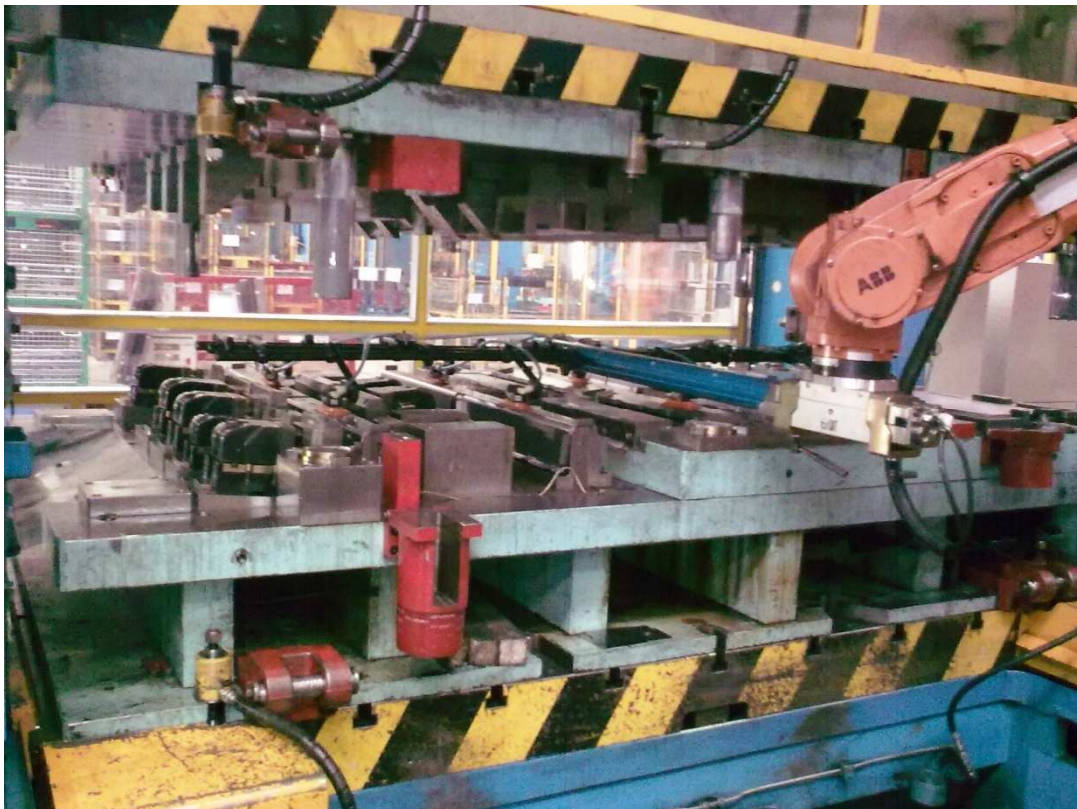
4.2 Apresentação das etapas de realização do componente

O processo de obtenção da peça é definido numa fase de estudo, onde de uma forma relativamente rápida se prevêem os passos da ferramenta, correspondentes operações e em que sequência se devem executar. Pretende-se também, nesta fase, encontrar uma solução que apresente um número reduzido de operações e de componentes da ferramenta, de modo a simplificar ao máximo o seu funcionamento, tendo sempre em conta o ponto de vista económico.



e

O conjunto de informações fornecida pelo Gabinete Técnico do cliente tem um peso importante na definição do processo, nomeadamente no modo de alimentação e descarga das peças, que neste caso específico consistirá de um robot que através de ventosas pneumáticas montadas num braço metálico (figura 4.6) procederá em simultâneo à alimentação da primeira operação, à transferência das peças de posto em posto e à descarga da peça final para um tapete transportador.

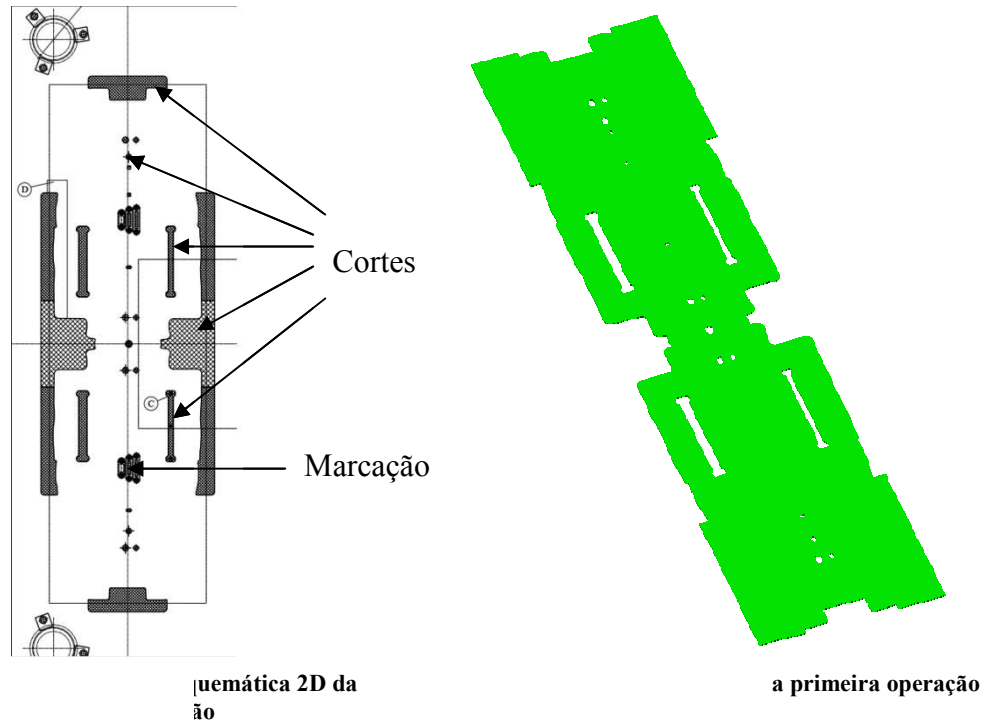


estamp Portugal

4.2.1 Primeira Operação – Corte, furação e marcação

O formato inicial da chapa é rectangular, $1227 \times 370 \text{ mm}$ como calculado mais adiante, e garante dimensões suficientes para que seja possível estampar o componente sem que haja falta de material.

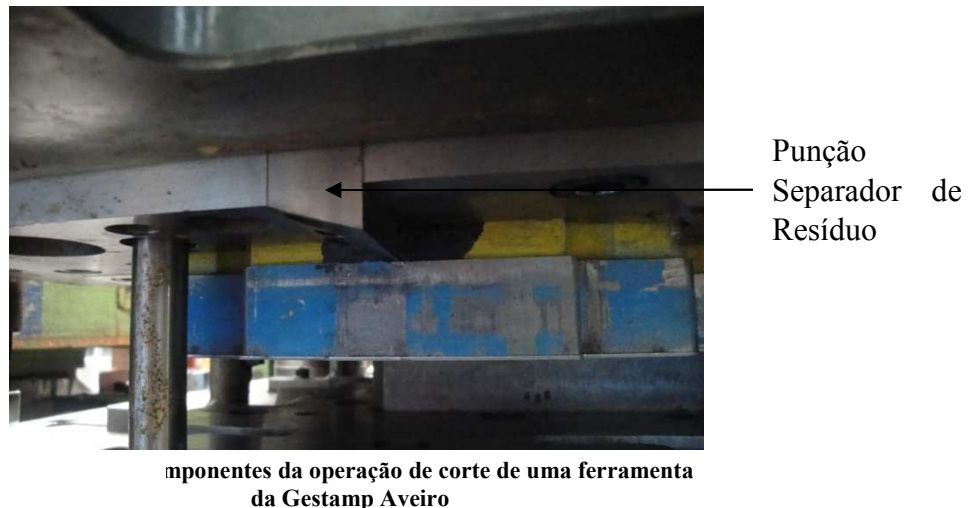
Nesta primeira operação são executados furos diversos, entre os quais um furo para pilotagem posterior. É definido o contorno, ou planificado, da chapa a estampar através de cortes nos



bordos e no interior da peça para remoção do material em excesso.

As linhas de corte são definidas com base na informação obtida recorrendo a um software específico, que determina uma linha que à partida irá favorecer a estampagem.

O corte do contorno da peça foi distribuído entre a primeira e a segunda operação para evitar que uma elevada quantidade de desperdício pudesse bloquear as saídas de resíduos, e assim provocar danos na ferramenta. Uma solução por vezes utilizada, tendo em conta este



problema, passa pela utilização de um punção separador de resíduo. Este pequeno punção é colocado entre dois punções de corte fazendo com que aquilo que poderia ser um desperdício único se divida em dois. Apesar de eficaz, para prevenir a existência de um resíduo demasiado grande, verificou-se na prática que a sua utilização se faz notar na linha de corte da peça, o que em determinados casos, como peças visíveis ou zonas de tolerâncias superficiais apertadas, não é admissível. Como solução a este problema foi então proposto que se passasse parte do corte do contorno para a segunda operação.

Um factor construtivo a ter em conta quando são efectuados cortes no contorno da peça, é que os punções responsáveis por este tipo de corte, ficam sujeitos durante a operação a esforços laterais, podendo causar a cedência dos mesmos e levando assim à criação de rebarba na peça, devido ao aumento da folga entre o punção e a matriz. Para evitar este efeito, são usadas as chamadas reacções que são montadas na parte inferior da ferramenta e que servem de apoio ao punção durante a operação de corte. As reacções, são componentes normalizados em bronze, que têm como principal característica implantes de grafite auto-lubrificantes (figura 4.10). Este tipo de componentes também se utiliza como elementos de guiamento das colunas das ferramentas. (figura 4.11).



Figura 4.11 - Elemento de guiamento de punções com cargas descentradas



Figura 4.10 - Casquilho usado para guiamento das colunas guia da ferramenta

Apesar de ser a primeira operação, esta é a última a ser construída pela serralharia. Apenas depois de testado o formato, se avança para a fabricação deste posto da ferramenta. Para testar o formato são cortados a laser algumas amostras de chapa do material com que serão produzidas as peças. De seguida as amostras são estampadas nas restantes operações verificando-se assim se o formato que se está a utilizar permite a obtenção da peça pretendida.

Nesta operação é também realizado o corte que dá origem a alguns dos furos da peça, parte dos quais servirão para pilotar a peça durante o processo. Entre estes cortes interiores dá-se destaque aos que abrem as chamadas janelas, que terão de ser dobradas posteriormente.

É também nesta operação que é feita a marcação da peça.

A marcação da peça é normalmente realizada no primeiro passo e não é mais do que uma pequena gravação onde normalmente aparece o símbolo do cliente da peça assim como datas e/ou códigos internos que permitam um posterior rastreio e identificação dos lotes de produção.



Figura 4.13 - Peça realizada com punção de marcação

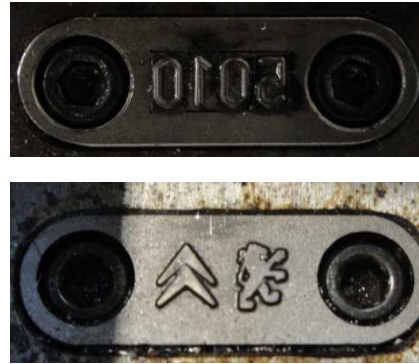


Figura 4.12 - Punções de marcação

Usualmente o marcador com o símbolo segue uma norma criada pelo próprio cliente. No caso concreto da PSA Peugeot Citroën existe o chamado Código MABEC, onde estão definidas as dimensões a utilizar (ANEXO B). Já o marcador numérico é um componente standard, constituído pelo um porta caracteres tipo T e por um conjunto de caracteres tipo T, sendo estes amovíveis, permitindo alteração simples e rápida dos mesmos. (ANEXO C)

Dada a pequena dimensão desta marcação, obtida por simples cunhagem, os esforços envolvidos foram considerados desprezáveis quando comparados com a força total necessária para obtenção da peça. Estima-se que não ultrapassarão os 200 kN de força.

Para as operações de corte a realizar nesta operação, a força necessária para o corte pode ser estimada pela seguinte fórmula:

$$Q = p \times s \times \frac{3}{4} \sigma_R$$

Sendo:

- Q – Esforço de corte necessário, em kg
- p – Perímetro de corte, em mm
- s – Espessura da chapa, em mm
- σ_R - Tensão de rotura, em kg/mm^2

As variáveis necessárias constam da informação técnica da peça, como é o caso da espessura da chapa, 1.17 mm , e da tensão de rotura que provém do material a utilizar, 44 kg/mm^2 . A excepção é o perímetro de corte, que é obtido através do AutoCad, 4500 mm .

$$Q = 4500 \times 1.17 \times \frac{3}{4} \cdot 44 = 173745 \text{ kg}$$

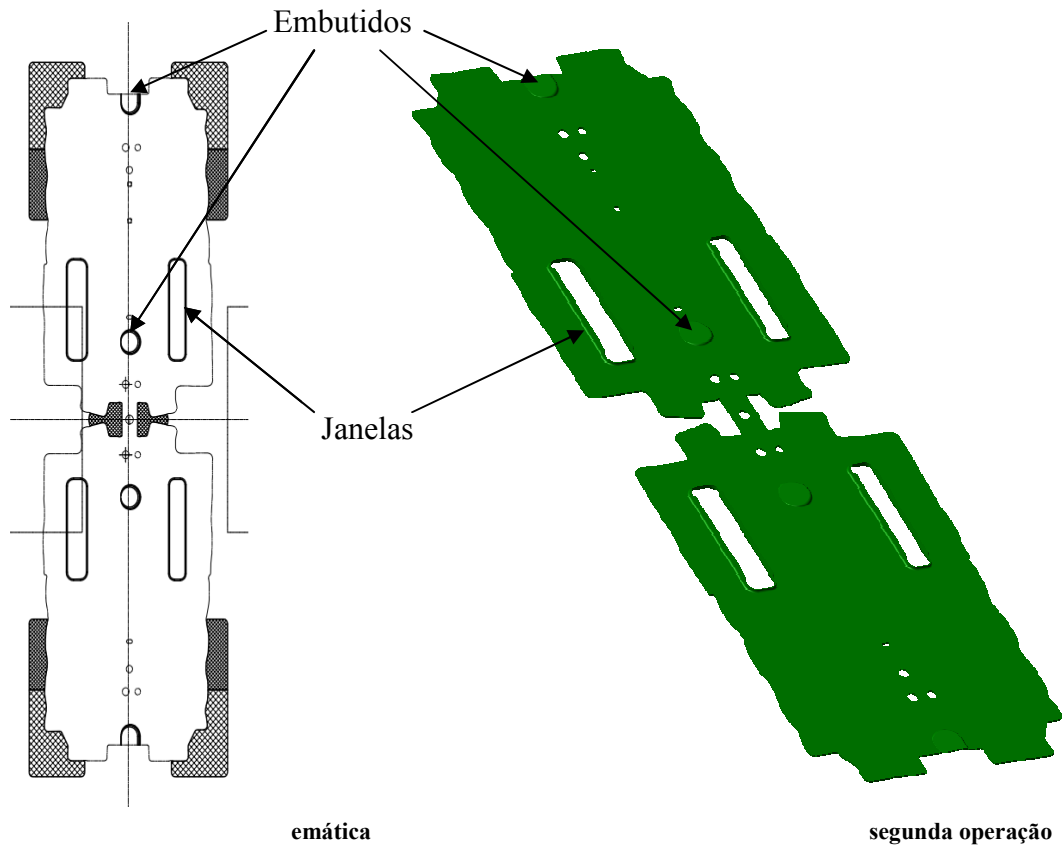
Normalmente este valor, 173.7 ton , é aumentado por um coeficiente de segurança de 1,1 a 1,2.

$$Q' = Q \times 1.2 = 173.7 \times 1.2 = 208.44 \text{ ton} \approx 208 \text{ ton}$$

Não havendo outro tipo de esforços, considera-se 208 ton como sendo o esforço necessário para esta operação.

4.2.2 Segunda Operação – Corte, dobragem das janelas e embutidos

Nesta operação ocorrem os primeiros embutidos ao mesmo tempo que é concluído o corte do contorno da peça e se procede à dobragem das janelas.



Os cortes de contorno ficam concluídos nesta operação, com a excepção de uma pequena zona no topo de cada peça, que como se pode ver na figura 4.15, mantém as duas peças unidas, até à última operação, onde é removida.

Os embutidos envolvidos nesta operação são de simples execução, pequenos e não muito acentuados, não apresentando por isso grandes dificuldades no processo de criação da ferramenta, contribuindo para tal o facto de serem efectuados com a chapa ainda plana.

Utilizando a fórmula já referida no capítulo anterior pode-se definir o esforço necessário para as operações de corte aqui envolvidas.

Nesta operação o perímetro de corte, obtido recorrendo ao AutoCad, tal como anteriormente, é de 1970 mm. As restantes variáveis mantêm-se inalteráveis, pelo que:

—

Para o cálculo dos esforços de dobragens utilizou-se uma fórmula prática baseada na fórmula utilizada para o cálculo do esforço de corte (Q), fraccionando-a em $2/3$.

Sendo P o esforço de dobragem:

O comprimento da linha de dobragem é, tal como nos casos anteriores, obtida pelo AutoCad, 1591 mm . Este valor considera as 2 janelas de cada peça.

Logo:

— —

Considera-se que esta já é uma fórmula com coeficiente de segurança considerável daí que não se aplica um novo coeficiente. Assim o esforço de dobragem é de 40.9 ton .

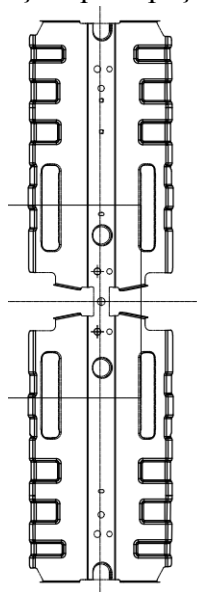
Esta fórmula é facilmente aplicável neste caso, por se tratar de uma forma simples e geométrica, contudo em dobragens mais complexas é impensável a realização deste cálculo desta forma.

Para o cálculo dos esforços de embutidura, existem processos de cálculo longos e complexos, não havendo uma forma simples e aproximada, daí que na prática estes não sejam calculados, recorrendo-se então aos programas de simulação.

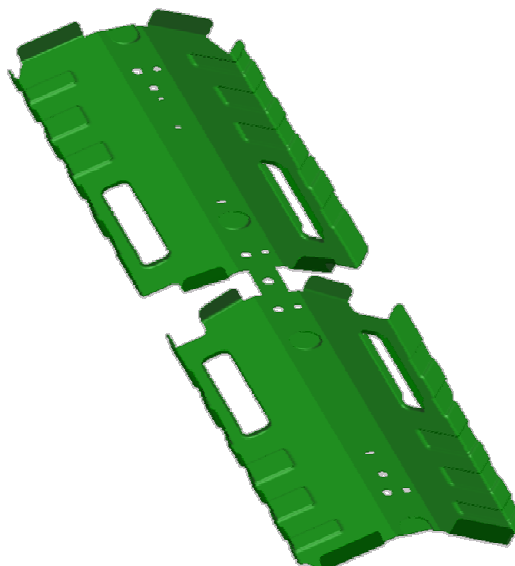
Como veremos mais adiante, o esforço total calculado para esta operação com o auxílio do programa de simulação foi de 240 KN , ou seja 24 ton .

4.2.3 Terceira Operação – Estampagem das abas e das nervuras

Esta operação é caracterizada por possuir duas operações de estampagem consecutivas, e é nesta operação que a peça ganha grande parte da sua forma.



nática 2D da



erceira operação

Para além do estampado das nervuras nas superfícies laterais da peça, estas são também dobradas, juntando-se assim às restantes 4 abas, 2 em cada topo de cada peça. É ainda realizada uma pré-dobragem na peça que na operação seguinte ficará completa.

A pré-dobragem da peça nesta operação foi decidida em virtude de se ter detectado uma contra saída numa das abas de topo de cada peça, que impediria a sua estampagem se fosse mantida a forma planar inicial. Para além disso, facilita ainda o posicionamento da peça na operação seguinte

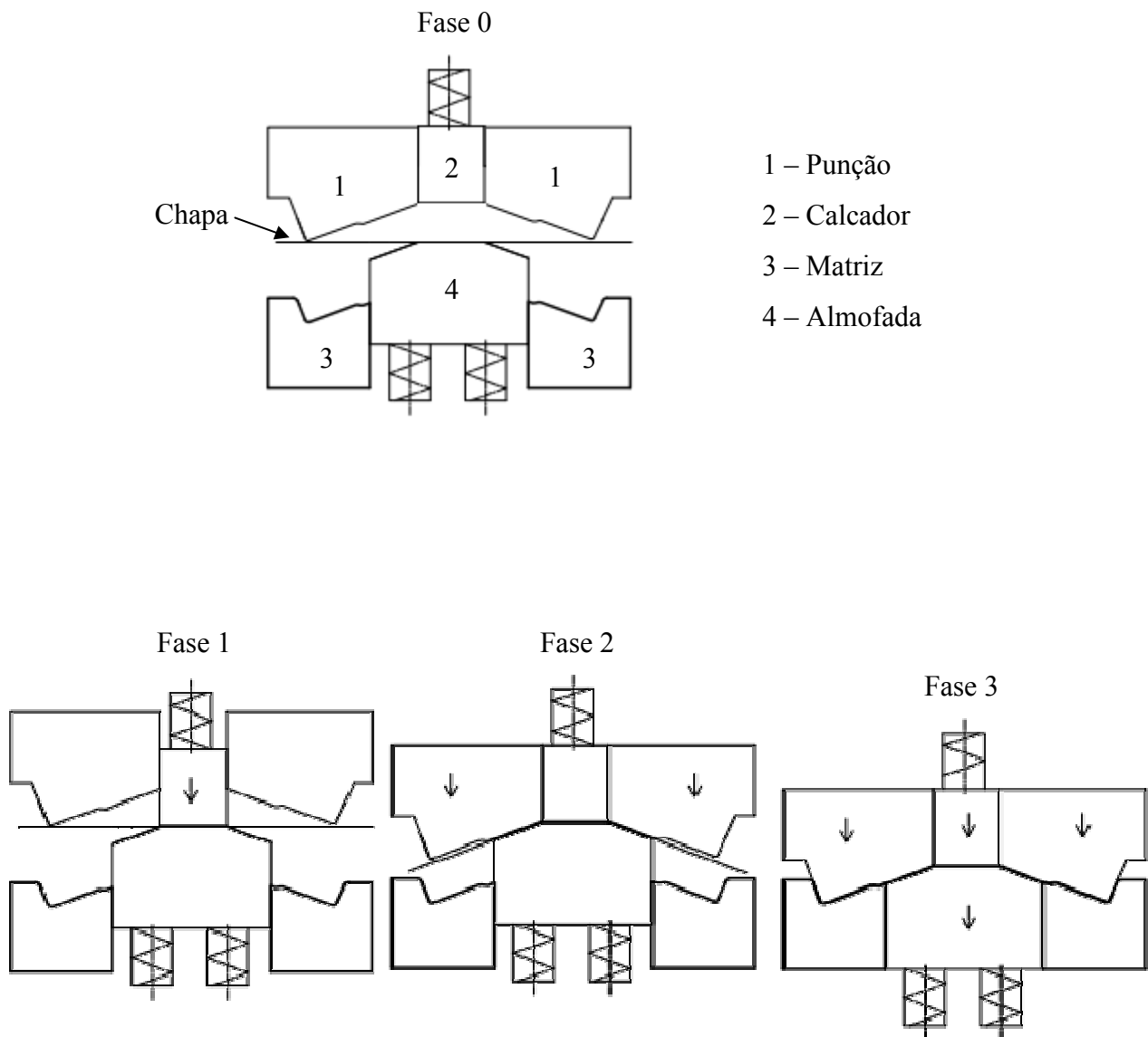


Figura 4.19 - Esquema da terceira operação

Na figura 4.18, é possível compreender, de uma forma geral, os principais componentes desta operação. A fase 0 corresponde à posição inicial, ou seja, quando a operação é alimentada, a chapa encontra-se posicionada mas ainda não ocorreu qualquer movimento da ferramenta.

Na fase 1 da figura 4.19, pode ver-se que o calcador é o primeiro componente a actuar, este é o responsável por manter a peça fixa na sua posição e impedir um arqueamento da chapa na fase 2 quando é feita a dobragem.

É na fase 2 que ocorre a primeira operação de estampagem, neste caso uma dobragem. Após o calcador calcar a peça, o punção desce até à posição demonstrada na figura. Este movimento garante a dobragem a peça, uma vez que as molas que sustentam a almofada, são dimensionadas para aguentar o esforço necessário à dobragem, garantindo assim a imobilidade da almofada até que a força exercida pela prensa seja superior.

Para a selecção das molas a utilizar, na almofada, recorre-se ao auxílio do programa de simulação que indicará a força de molas necessária de modo a permitir a realização da estampagem na almofada.

Na última fase, o calcador e o punção funcionam como um punção só e descem em direcção à matriz, sempre com a força contrária da almofada que apesar de vencida e de recuar garante a fixação da peça contra o punção. O movimento de descida é feito até que a almofada fique em concordância com a matriz. Ao longo da descida a chapa foi sujeita a uma dobragem nas abas ao mesmo tempo que foram efectuados diversos embutidos, criando-se assim as nervuras nas laterais das peças.

4.2.4 Quarta Operação – Estampagem das faces laterais

Esta operação dá a forma final à peça através da dobragem completa das faces laterais da peça.

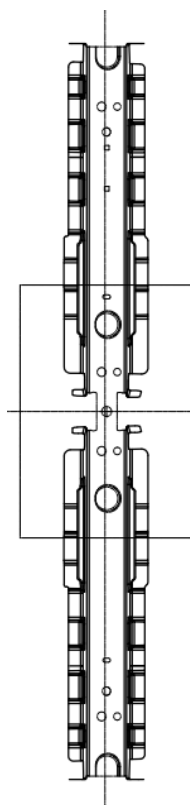


Figura 4.21 - Representação esquemática 2D da quarta operação

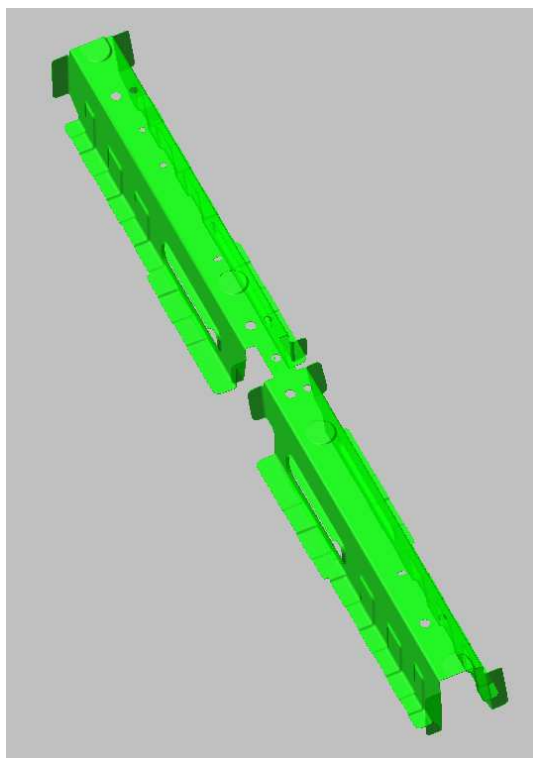


Figura 4.20 - 3D da peça após quarta operação

Devido ao retorno elástico e tendo em conta o ângulo pretendido, a peça não é posicionada com a face superior na horizontal. Desta forma a estampagem, que apenas permite que as faces fiquem verticais, consegue infligir à peça um ângulo inferior a 90° entre a face superior e a face esquerda (figura 4.22).



Figura 4.22 - Antes e Depois da quarta operação

O ângulo a que é sujeita a face esquerda tem que ser superior ao pretendido para que posteriormente seja compensado o retorno elástico, e esta recue para o ângulo pretendido.

Nesta operação o cálculo do ângulo de compensação do retorno elástico é conseguido com o auxílio do software de simulação.

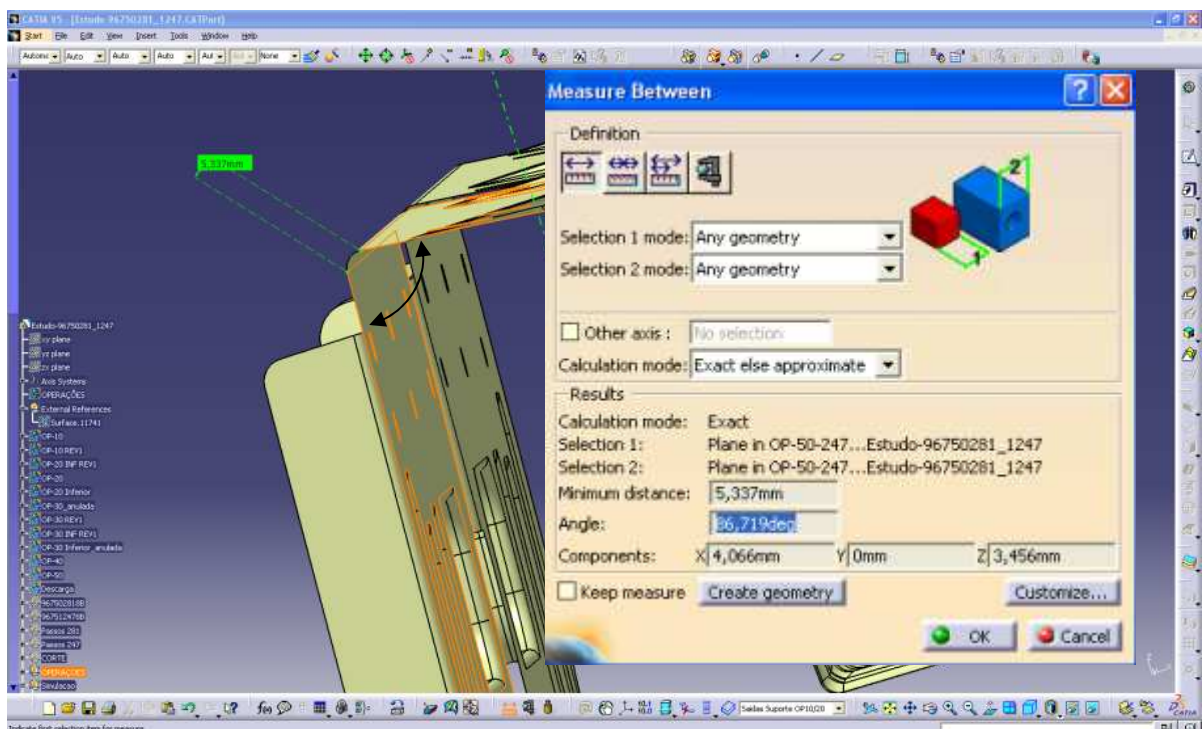


Figura 4.23 - Ângulo entre face lateral e face de topo (86.72°)

4.2.5 Quinta Operação – Furação lateral e separação

A quinta operação, a última desta ferramenta, é onde são realizados os furos das superfícies laterais e é feita a separação da peça esquerda da direita.

Para a realização dos furos, visto estes não estarem numa superfície horizontal mas sim vertical, são utilizados carros. Estes carros são componentes normalizados que vão permitir a realização de furos em direcções não verticais, ou seja, oblíquos à linha vertical de actuação da prensa.

O motivo pelos quais estes furos não foram realizados na primeira operação, juntamente com os restantes, prende-se com o facto de ficarem sujeitos a deformações durante as estampagens das operações anteriores. Este problema não existe nos furos realizados na zona central da peça, dado esta face estar sempre calcada.

A separação não é mais do que uma pequena operação de corte realizada na pequena porção de material que une a peça esquerda à direita.

O perímetro de corte, obtido recorrendo ao AutoCad é de 748 mm. Pelo que o esforço de corte (Q) é calculado por:

$$Q = 748 \times 1.17 \times \frac{3}{4} \cdot 44 = 28880.28 \text{ kg}$$

$$Q' = Q \times 1.2 = 28.9 \times 1.2 = 34.68 \text{ ton}$$

O resultado obtido é o esforço necessário para um corte perpendicular à superfície, assim, o esforço da prensa terá de ser superior a este, e vai depender do ângulo existente entre a cunha de actuação e o rolete do carro.

4.3 Apresentação do trabalho de simulação realizado

4.3.1 Definição das dimensões do esboço (chapa inicial)

A primeira preocupação no uso da simulação numérica, recai sobre as dimensões do esboço inicial da peça. Para isso, e uma vez que o cliente fornece um desenho a 3D da peça final, a primeira etapa passa pela utilização de um software destinado à definição do planificado, de modo a garantir que se tenha a quantidade de chapa necessária para a obtenção da peça final.

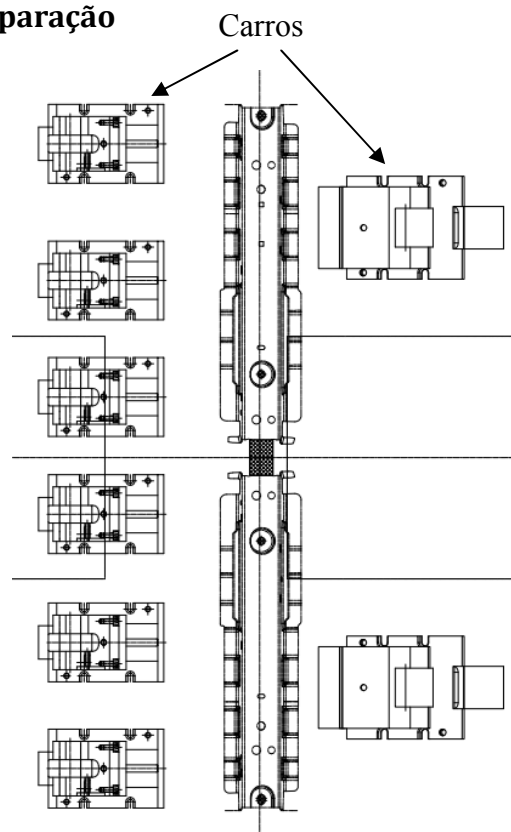


Figura 4.24 - Representação esquemática 2D da quinta operação

Para além de planificar a peça, este tipo de software, permite também a realização de estudos “Nesting”, isto é, estudos sobre a disposição do planificado da peça ao longo de uma banda ou formato de chapa inicial, para assegurar a maior economia de matéria-prima na sua produção.

A planificação obtida pode ser disposta em diversas posições no formato da chapa inicial. Neste caso concreto, devido às dimensões da máquina destinada ao processo aliadas ao número de operações a serem executadas obriga a uma só escolha.

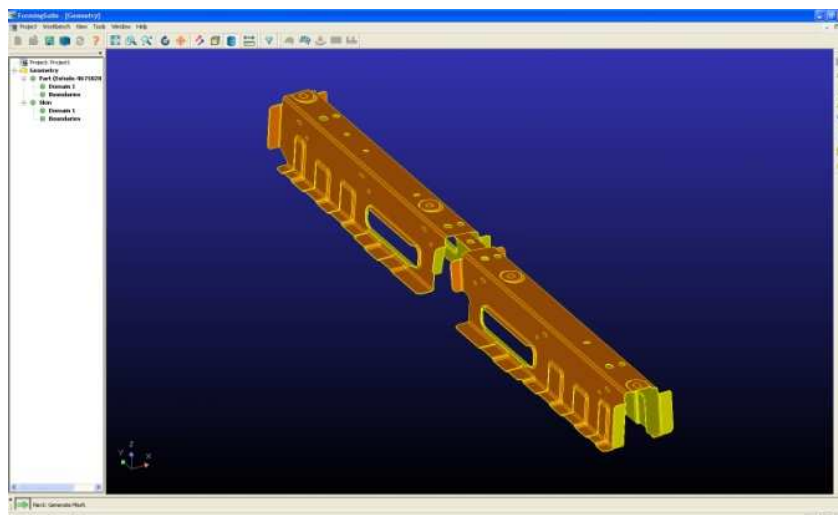


Figura 4.26 - Peça a planificar

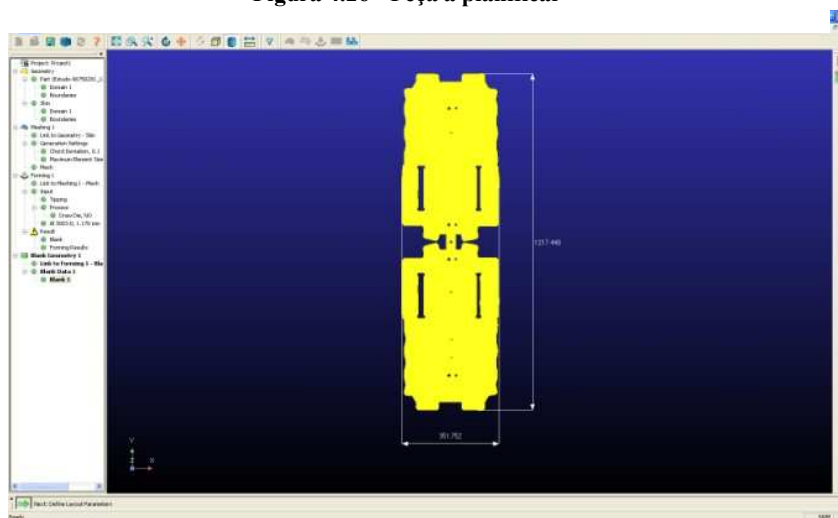


Figura 4.25 - Planificação da peça e dimensões de chapa necessárias

Assim, as dimensões referidas pelo programa são de 351,8x1217,4 mm. Contudo, está estabelecido que para cortes de chapa fina, como o caso, é dada uma margem de 5 mm para cada lado. Ainda assim, e dada a experiência dos projectistas, muitas vezes é preferível dar margens um pouco superiores. Assim sendo, o esboço escolhido terá um formato rectangular de 1227x370 mm.

Uma vez que em todas as simulações que se irão realizar, será apenas simulada uma das duas peças obtidas com este formato, o formato utilizado nas simulações será de 613.5x370mm.

4.3.2 Definição do contorno do planificado

Tendo a primeira operação da ferramenta como objectivo efectuar o corte exterior que dará o contorno do planificado da peça, assim como os cortes interiores de zonas sujeitas a posterior estampagem, a definição destes contornos é o passo seguinte a dar.

Para isso, será utilizada uma ferramenta disponível no software de simulação, que permite definir a linha de corte, designada tecnicamente por “Trim”.

Com o objectivo de definir como deve ser efectuado o corte das janelas existentes nas superfícies laterais, começa-se então por simular a sua estampagem, que ocorre na segunda operação da ferramenta, o que permitirá obter o contorno adequado destes cortes.

Posteriormente, será definido o contorno exterior da peça pelo mesmo processo, isto é, simulando a sua estampagem, que se realiza na terceira operação da ferramenta.

4.3.2.1 Contorno das janelas

4.3.2.1.1 Preparação da simulação

Para definirmos em detalhe o contorno dos cortes, a fazer para obter as referidas janelas, é necessário fornecer ao software uma geometria que será utilizada para criar os respectivos punções, matrizes e cerra-chapas.

A geometria a introduzir parte do desenho original e é trabalhado em CAD a 3D, dando-lhe a forma a obter no final da segunda operação. Neste caso devido à necessidade dos punções para embutir as janelas, estes foram também criados em CAD a 3D e adicionados ao desenho original.

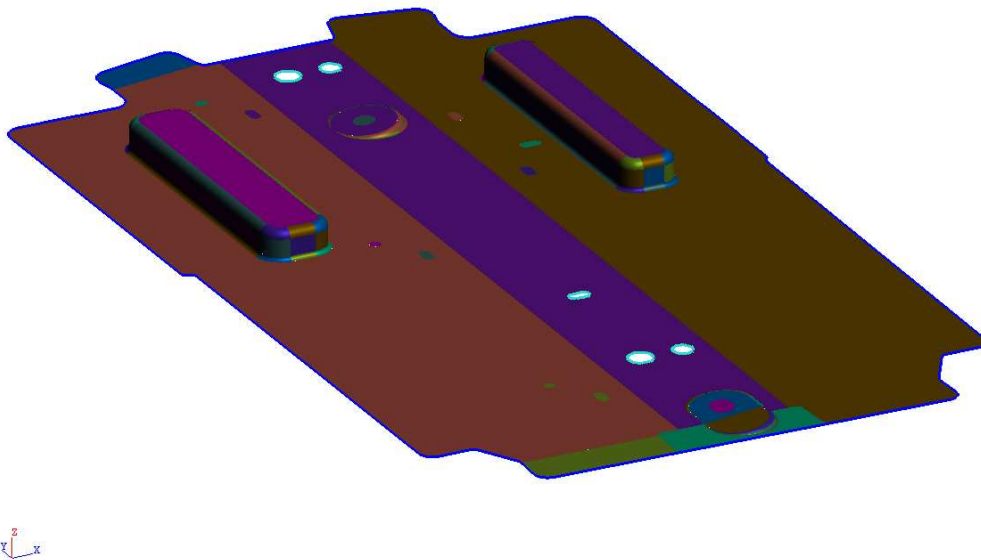


Figura 4.27 - Geometria Introduzida para a simulação da segunda operação

Como a geometria introduzida possui furos, é necessário proceder à sua remoção de modo a não adulterar os cálculos dos esforços da operação uma vez que não se realizam agora.

Com esta geometria, através da selecção das superfícies pretendidas, é possível criar os três

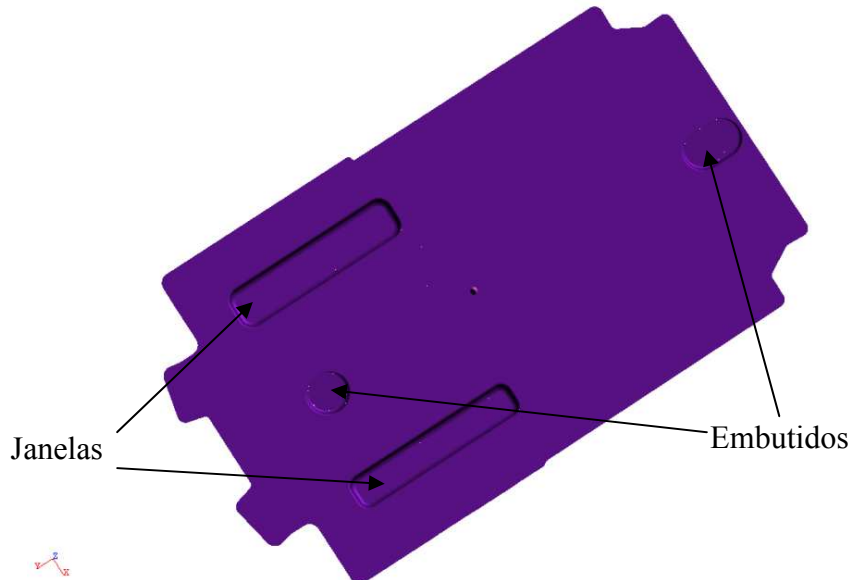


Figura 4.28 - Matriz utilizada na simulação da segunda operação

componentes da ferramenta necessários para a realização da estampagem, matriz, punção e cerra-chapas.

A matriz utilizada na simulação, colocada na parte superior da ferramenta, consiste num plano com as fêmeas, para os dois embutidos, e os rasgos para os punções responsáveis pela dobragem das janelas.

Como se pode ver pelas imagens, a matriz da simulação e a matriz criada no projecto são em tudo idênticas. Este pormenor é muito importante para que os resultados da simulação sejam os mais reais possíveis.

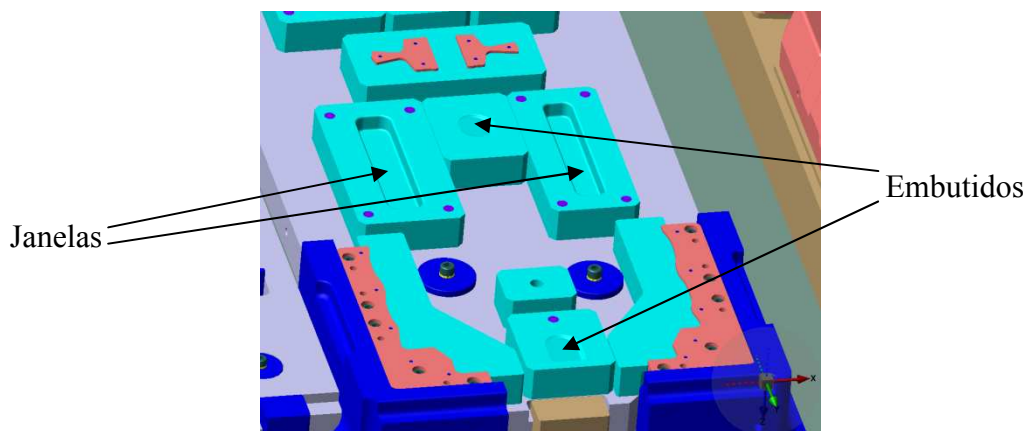


Figura 4.29 - Matriz da segunda operação (Projecto)

O cerra-chapas, tem como função prender a chapa contra a matriz evitando enrugamentos e garantindo um bom estiramento do material, sendo a sua geometria um plano com furos nas zonas por onde passarão os punções.

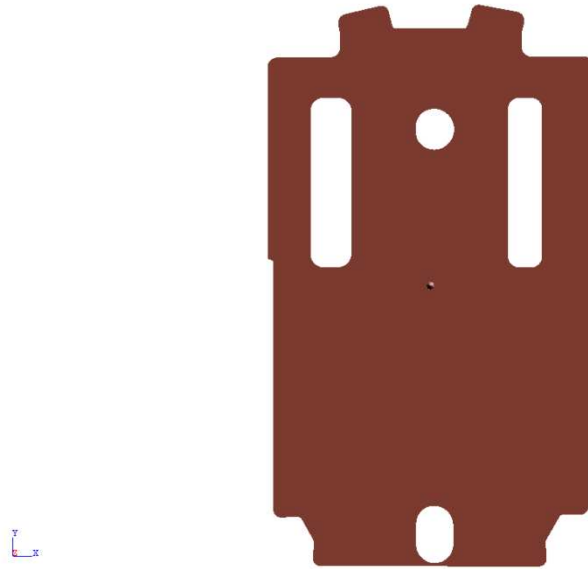


Figura 4.30 - Cerra-chapas da simulação da segunda operação

Os punções a utilizar nesta operação serão os machos que vão criar os embutidos e as dobras nas janelas.

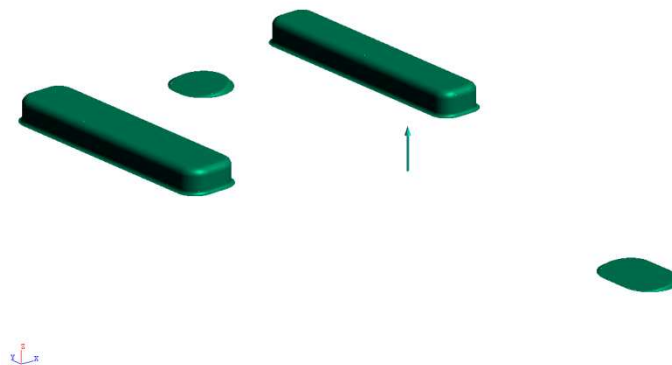


Figura 4.31 - Punções da simulação da segunda operação

Contudo, as ferramentas não são definidas imediatamente após dada a geometria, antes disso é preciso definir o tipo de simulação que se pretende realizar e indicar-se o tipo de estampagem a realizar, o sentido da gravidade, a espessura da chapa e a qual o lado da peça a que se refere a geometria importada.

Podem ser simulados vários tipos de estampagem. Uma estampagem simples sem recurso a um pisador, apenas um punção e uma matriz, ou uma estampagem em que existe um pisador ou um cerra-chapas, e na qual a posição da matriz e do punção estão alternadas. Uma outra possibilidade de simulação diz respeito às operações de corte.

No caso em estudo pretende-se ter uma matriz superior, um punção inferior e um cerra-chapas.

A definição da espessura e do lado da peça considerado, permite a criação de *offsets*, necessários à conjugação dos punções, matrizes, cerra-chapas e peça.

Outras variáveis que devem ser definidas para além dos movimentos dos componentes da ferramenta, do material e da geometria da chapa inicial, são as condições de lubrificação, a força das molas e outras informações extras para casos específicos.

Para o formato da chapa, que poderia ter sido desenhado livremente ou segundo uma forma geométrica, preferiu-se proceder à sua importação, a partir do CAD 3D, pois já tinha sido estudada uma aproximação ao formato que seria necessário fornecer a esta operação. Com isto pretende-se reduzir o tempo da simulação de “Trim”.

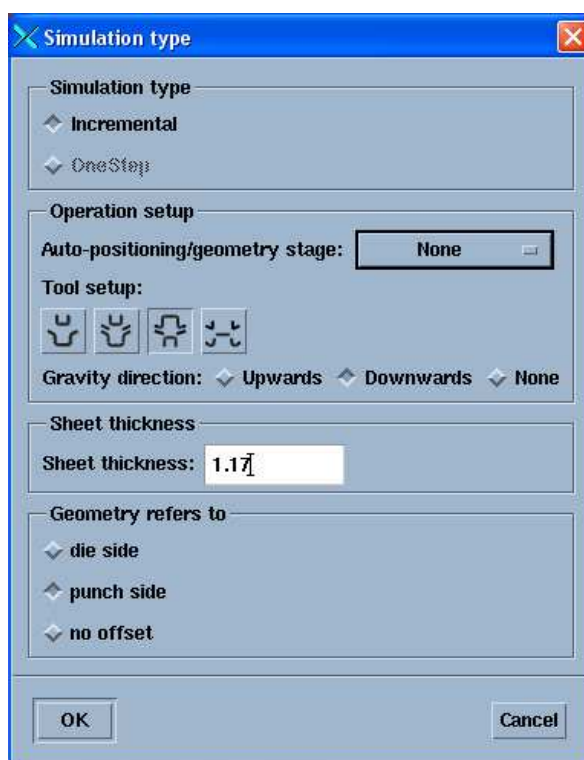


Figura 4.32 - Menu de escolha do tipo de simulação



Ao seleccionar a força exercida por pisadores e cerra-chapas, define-se a carga das molas a utilizar para actuação destes, e que posteriormente será utilizada no dimensionamento das molas no projecto da ferramenta.

A primeira etapa, é onde se simula a acção da alimentação do formato pelo transfer ao posto da ferramenta. Considerando apenas a actuação do cerra-chapas sobre o qual é largada a chapa simula-se o efeito da gravidade para verificar a estabilidade da peça.

Na terceira e última etapa ocorre a deformação da chapa. Aqui o punção vai trabalhar como um corpo rígido e estacionário, oferecendo assim resistência à chapa. O cerra-chapas é configurado para oferecer uma resistência de 30 kN ao movimento descendente da matriz em direcção ao punção. A matriz ao vencer a força das molas provoca o movimento descendente do cerra-chapas levando a chapa a deslizar ao longo do punção efectuando-se a estampagem.

46

4.3.2.1.2 Verificação dos resultados intermédios da simulação

Após o processamento da simulação é possível navegar ao longo desta, visualizando a diversa informação gráfica que o programa de simulação permite em qualquer ponto da estampagem.

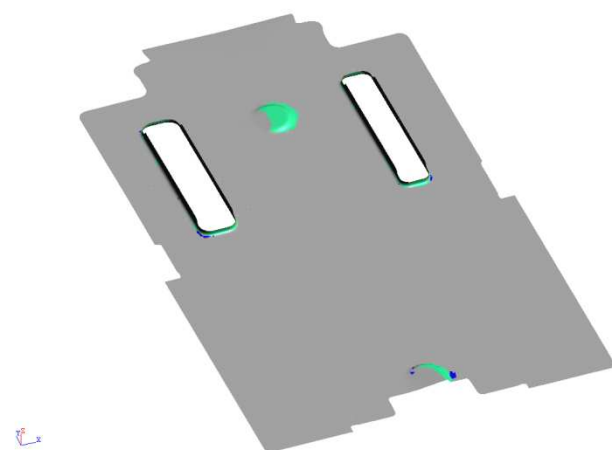


ção

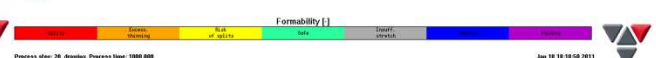
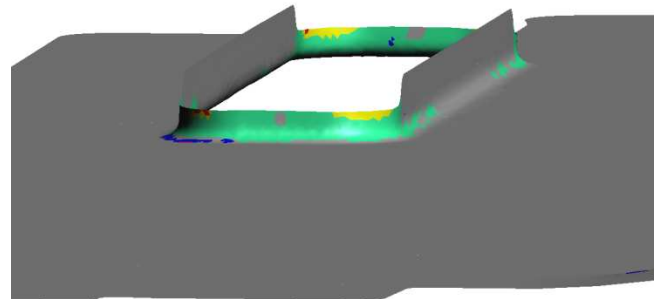
Neste momento e com a simulação já realizada, efectua-se uma verificação da zona na qual se pretende otimizar o contorno.

Facilmente se pode verificar nas figuras 4.35 e 4.36 que a simulação ocorreu dentro do esperado, tendo-se conseguido os embutidos e dobras pretendidos.

Ao verificar o estado geral da peça é possível constatar que os embutidos foram realizados de uma forma eficaz e não levantam quaisquer questões. Já no que toca às dobras das abas das janelas estas apresentam ligeiras indicações de fissura e de possível risco de fissura. Contudo, esta indicação não representa preocupação para a equipa de projecto, dada a simplicidade da dobra e a existência de inúmeros casos de sucesso em dobras semelhantes. Este resultado é pois considerado como positivo e aceite.



o dos limites de
zonas críticas



nor das Janelas

Outra informação relevante que pode ser obtida, é o esforço a que estão sujeitos os diferentes componentes da ferramenta ao longo do processo.

Pode-se então saber qual a força necessária para este processo em função do tempo de processamento usado na simulação

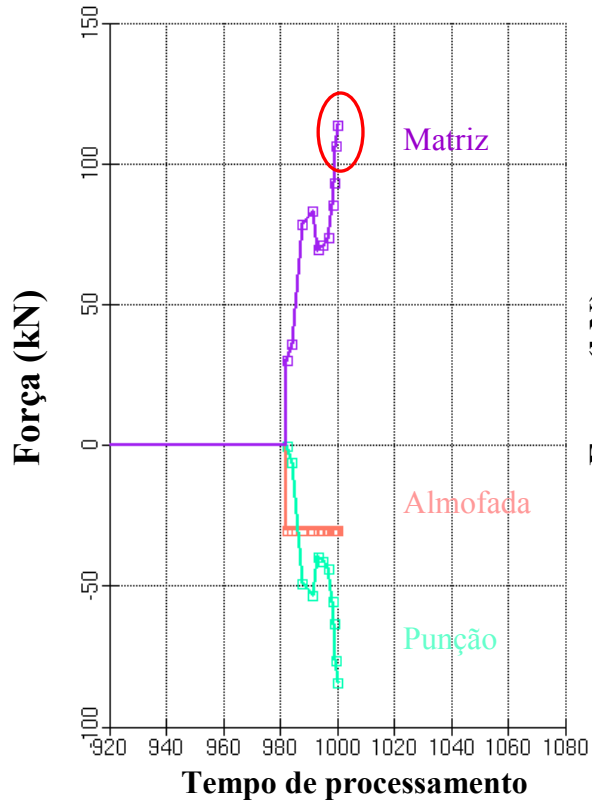


Figura 4.38 - Esforço dos componentes da segunda operação

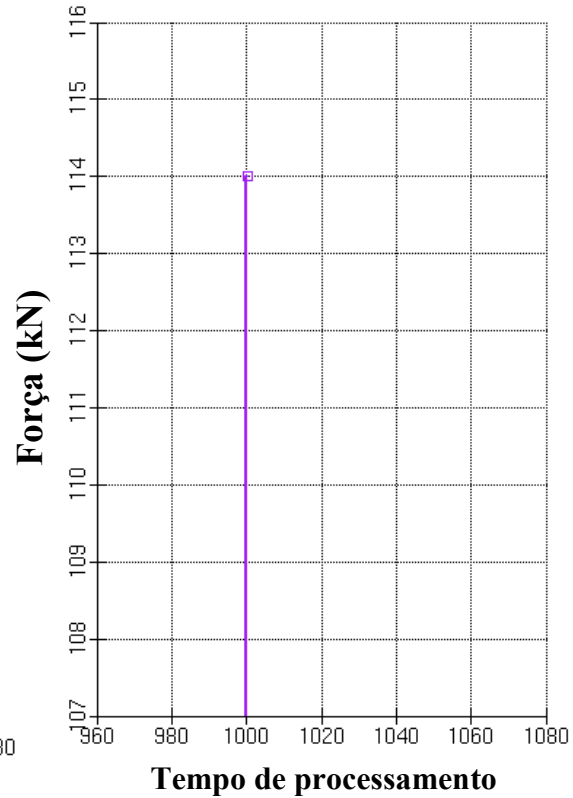


Figura 4.37 – Zoom da figura 4.37 (Esforço máximo da matriz da segunda operação)

Visualizando o gráfico da figura 4.37 pode-se constatar os esforços dos três componentes.

Como é perceptível e esperado, o esforço do punção somado ao do cerra-chapas iguala o esforço da matriz, daí que se considere o valor apresentado para a matriz como o esforço total da operação.

4.3.2.1.3 Início do processo de definição do contorno (operação de *trim*)

Para dar início ao processo de definição do contorno, neste caso das janelas, é necessário identificar as linhas de contorno que se encontram já deformadas e que se pretendem otimizar.

Este passo é dado tendo em conta as linhas existentes na peça, já simulada, ou poderá também ser fornecida através de uma importação das mesmas caso o trabalho tenha sido realizado previamente num formato IGS.

Como informação complementar deve ser indicado o número máximo de iterações que se pretende que o programa execute e o desvio máximo aceitável.

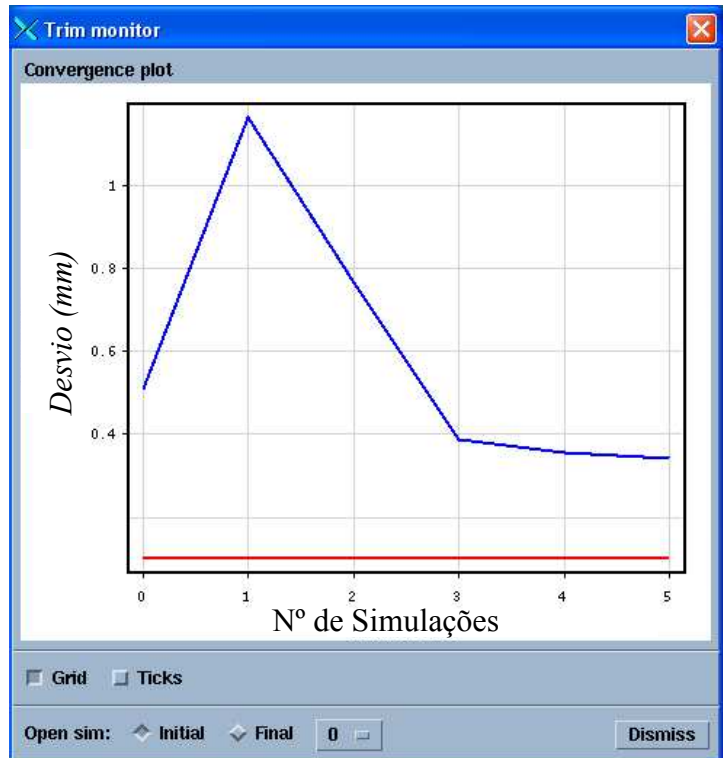
A definição do valor máximo de desvio admissível foi fixada em 0,1 mm por ser um valor já considerado exigente, uma vez que a tolerância do contorno das janelas após estampagem é de $\pm 1,5$ mm.

Uma vez que já se parte de uma geometria que se espera ser semelhante à geometria final, o número de iterações definido foi de 5.

4.3.2.1.4 Resultados da operação de trim

Não tendo sido obtido um desvio inferior ao imposto, as 5 iterações são executadas tal como indicado anteriormente. Após a conclusão do processo, é criado um gráfico automaticamente com os respectivos desvios verificados em cada iteração. A análise deste gráfico permite identificar a tendência dos resultados e decidir se há benefícios em utilizar o melhor resultado obtido para a execução de uma nova operação de trim, ou considera-lo como final.

No gráfico apresentado na figura 4.39, a linha vermelha representa a tolerância de 0,1 mm imposta anteriormente, representando a linha azul os resultados obtidos em cada iteração.



Atendendo à tendência decrescente do gráfico seria de prever uma nova simulação usando a linha de contorno definida na iteração número 5 como linha inicial, com o intuito de assim obter resultados mais próximos do intervalo de tolerância pretendido. Contudo, uma vez que a tolerância definida para o contorno das janelas é de $\pm 1,5$ mm, como referido anteriormente, o resultado desta iteração cumpre os requisitos da peça, e como tal, não se justifica a repetição da operação.

Caso estes contornos tivessem tolerâncias mais apertadas, poderia ser vantajoso o recurso à operação de definição de contorno de uma forma individual, isto é, realizar uma operação de trim para cada janela. Uma vez que, ao efectuar a operação de trim em simultâneo são também rejeitadas as soluções nas quais o contorno de uma das janelas está dentro do intervalo de tolerância pretendido e o outro não.

Neste momento pode-se proceder à exportação do contorno obtido na iteração 5 e fornecê-lo ao projectista da ferramenta como sendo o melhor contorno de corte das janelas para realizar na primeira operação da ferramenta.

4.3.2.2 Contorno exterior da peça

Tal como para a definição do contorno das janelas no capítulo anterior, terá de se realizar a simulação referente à deformação existente no contorno que se pretende otimizar.

Uma vez que o contorno exterior da peça é executado pela ferramenta na sua terceira operação, proceder-se-á à sua simulação.

Os passos a seguir são os mesmos referidos anteriormente, ou seja, partir da geometria da peça em CAD 3D e preparar uma superfície com a qual seja possível definir os componentes da ferramenta.

A geometria fornecida para a simulação da terceira operação da ferramenta foi, tal como a anterior, elaborada em CAD 3D e desta forma os furos foram removidos criando-se também o “addendum” necessário à dobragem das suas abas laterais e de topo.

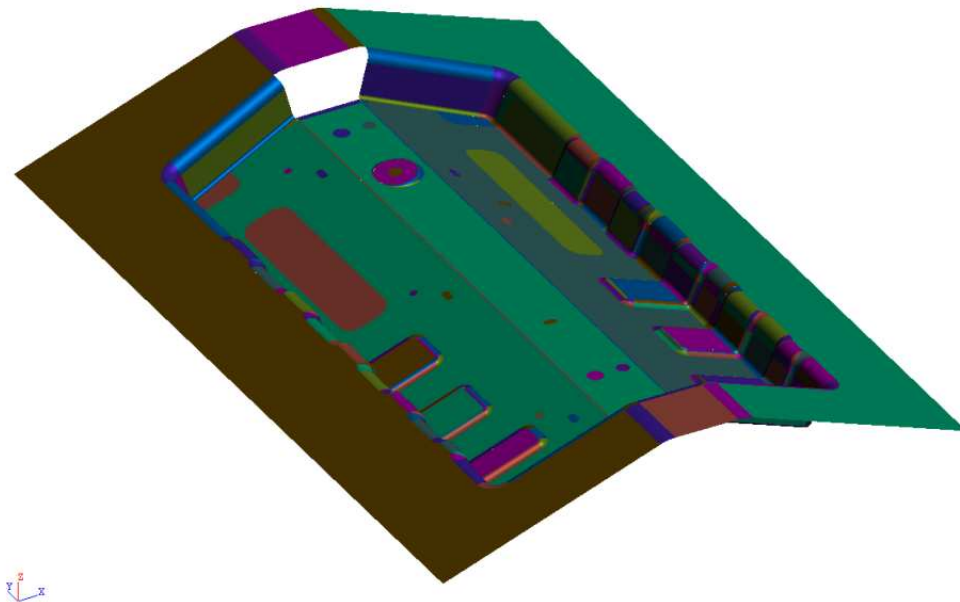


Figura 4.40 - Geometria da terceira operação da ferramenta

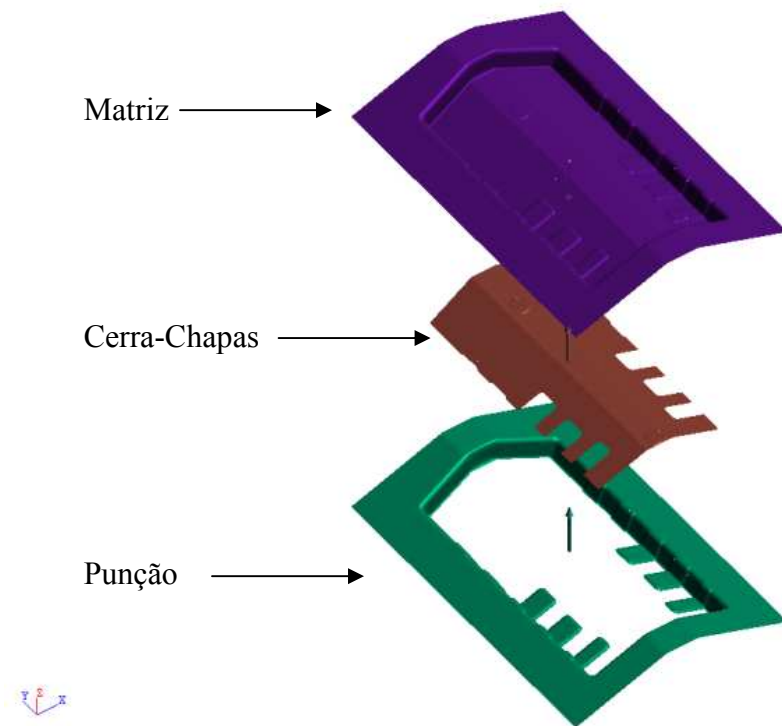


Figura 4.41 - Componentes da ferramenta da simulação da terceira operação

A matriz da simulação, foi considerada coincidente com a geometria fornecida ao programa de simulação, embora apenas o seu interior tenha parte activa no decorrer do processo de simulação.

No caso da almofada da simulação, que será responsável pela dobragem das superfícies laterais, tal como mostra a figura 4.41, foram retirados os espaços por onde o punção entrará, assim como a superfície do “addendum”.

O punção da simulação é constituído não só pelo próprio punção como também pelo “addendum”.

As etapas e os processos da simulação da terceira operação foram configurados de igual forma à simulação da segunda operação.

Visualizando o resultado final da simulação, apresentado na figura 4.42, podemos concluir que a simulação foi bem sucedida, uma vez que os resultados são satisfatórios.

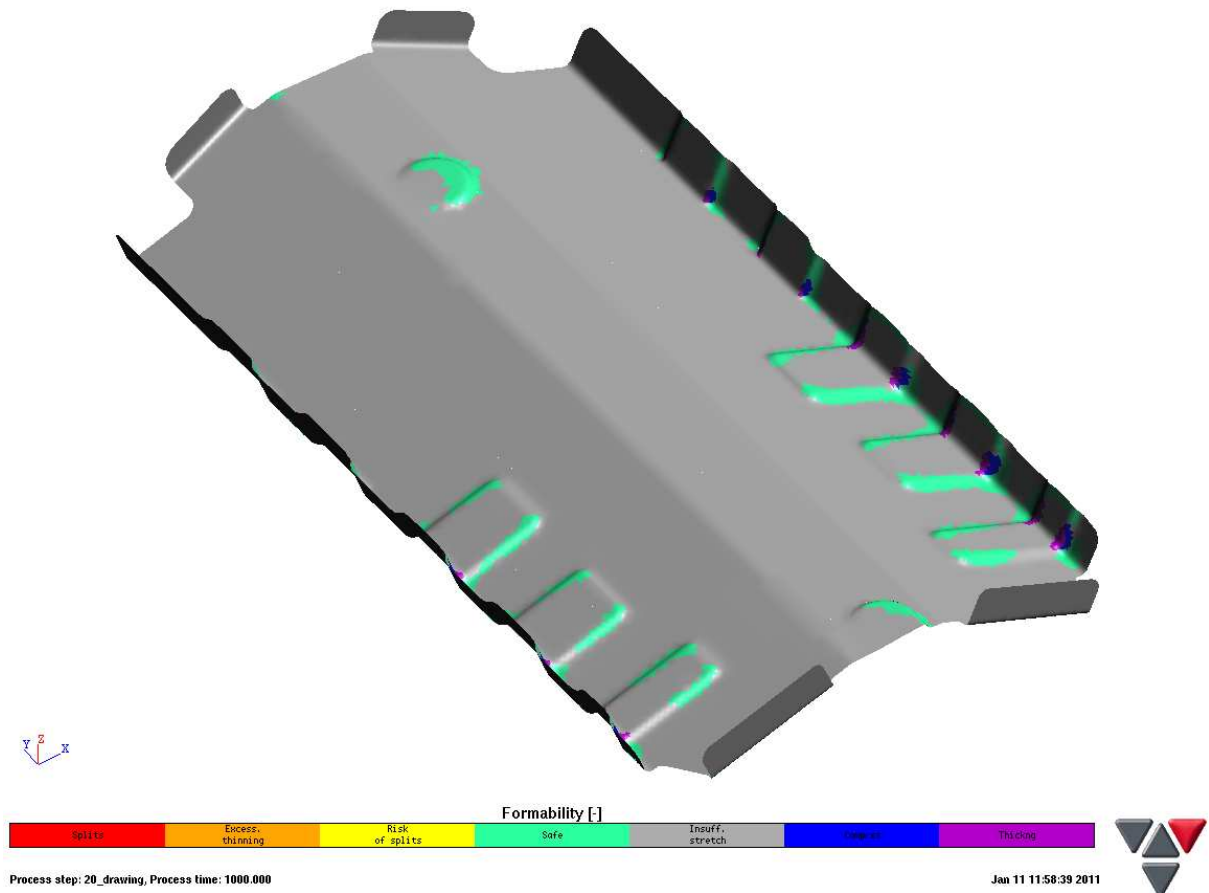


Figura 4.42 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas, após a terceira operação

Nesta simulação, para a realização da operação de *trim*, apesar do contorno geral de corte da peça ser também de $\pm 1,5 \text{ mm}$, decidiu-se trabalhar com uma tolerância para a execução de *trim* de $0,5 \text{ mm}$, maior que a considerada na operação anterior, para que se utilizasse um resultado melhor numa segunda operação de *trim* mais apurada.

O gráfico da figura 4.43 mostra que se ficou muito aquém do valor pretendido, sendo no entanto visível uma melhoria no contorno definido pelo programa de simulação face ao contorno inicialmente fornecido.

Seguindo um raciocínio iterativo, iniciar-se-á um novo processo *trim*, tendo como base, os resultados da iteração número 4 definida pelo software, que é considerada a mais

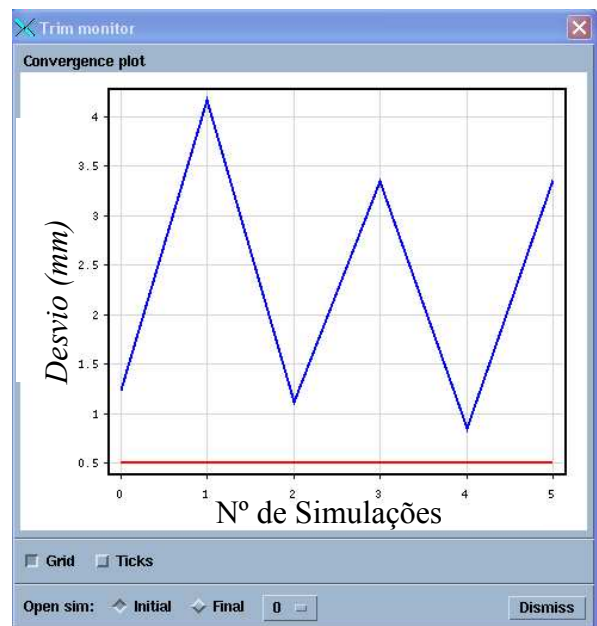


Figura 4.43 - Desvios obtidos para as iterações realizadas na primeira operação de *trim*

satisfatória.

Neste segundo *trim* é exigido um valor de desvio máximo mais apertado, 0,3 mm. No entanto como se pode constatar pela figura 4.44, as novas iterações não conseguem melhorar o resultado já obtido anteriormente, muito menos aproximá-lo dos 0,3 mm pretendidos. Daí que seja considerado então o contorno obtido na iteração 4 da simulação anterior para utilização na fase de projecto da ferramenta, visto ser aceitável perante a tolerância exigida para o contorno geral da peça.

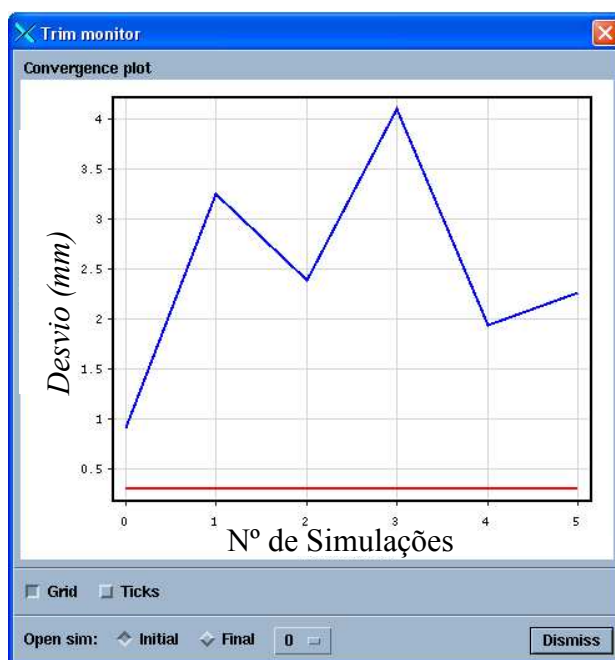


Figura 4.44 - Desvios obtidos para as iterações realizadas na segunda operação de *trim*

Concluída esta fase, estão reunidas as condições para que seja possível executar as acções de corte das duas primeiras operações da ferramenta, pois poderemos definir as geometrias definitivas dos punções e das matrizes.

4.3.2.3 Notas complementares

Este estudo foi realizado de uma forma rápida, tendo em conta a urgência do fornecimento desta informação ao projectista. Esta informação permite desenvolver por completo o projecto da primeira e segunda operação da ferramenta.

Uma vez que estas simulações são referentes à linha de contorno da peça e das janelas, é de todo o interesse simular todas as operações de estampagem da ferramenta, com o objectivo principal de observar o comportamento da peça ao longo das cinco operações de estampagem.

Desta forma, serão consideradas no início de cada operação, as deformações sofridas nas operações anteriores.

4.3.3 Simulação Completa de Todo o Processo de Estampagem

4.3.3.1 Primeira Operação – Corte e furação

No caso das operações de corte, não existe necessidade de fornecer uma geometria para que sejam criados os componentes da ferramenta.

Para definir a zona de corte utilizam-se as linhas de contorno anteriormente obtidas, usando directamente os resultados das operações de *trim* e utilizando do desenho inicialmente fornecido da peça as linhas de contorno dos furos normalizados sobre os quais não se realizaram operações de definição de contorno.

Como já referido anteriormente, o formato definido para a simulação terá uma dimensão de $613.5 \times 370 \text{ mm}$. A restante configuração desta simulação passa por definir o sentido real da gravidade, a espessura da peça ($1,17 \text{ mm}$), a qualidade da chapa e as condições de lubrificação.

Uma vez definidos os parâmetros referidos, a execução da simulação é bastante rápida, por se tratar apenas de operações de corte, que por não envolverem deformações da chapa, não obrigam o programa a aplicar o Método dos Elementos Finitos.

Concluída a simulação e comprovados os resultados (figura 4.45), pode-se avançar para a simulação da operação seguinte, registando o esforço utilizado para o corte de uma peça, neste caso, muito próximo das 97.5 ton . Para duas peças o esforço necessário ao corte seria de 195 ton , o que podemos considerar estar de acordo com as 208 ton calculadas anteriormente no capítulo 4.2.1.



Figura 4.45 - Planificado da peça após a primeira operação

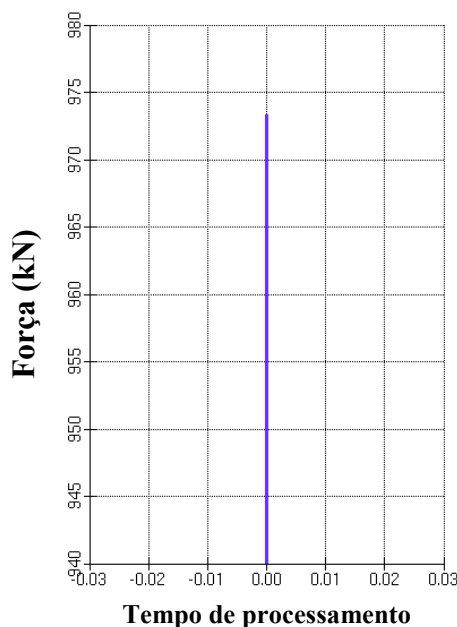


Figura 4.46 - Esforço de Corte da primeira operação

4.3.3.2 Segunda Operação – Corte, dobragem das janelas e embutidos

A diferença entre a simulação da segunda operação, realizada anteriormente para definição do contorno, e a simulação que se pretende executar agora, reside no formato, que agora possui os cortes de contorno e furações realizados na primeira operação.

Nesta operação o formato será submetido aos cortes de contorno em falta, à estampagem dos dois embutidos e à dobragem das abas das janelas.

A geometria adicionada para esta simulação é a mesma que foi utilizada na anterior simulação da segunda operação, assim como a forma e a configuração dos componentes da ferramenta. É unicamente necessário, identificar os cortes a realizar, tal como na simulação da primeira operação, acima referida.

Os resultados obtidos no fim desta simulação, são idênticos aos obtidos na simulação da segunda operação, aquando da definição do contorno (figura 4.47).

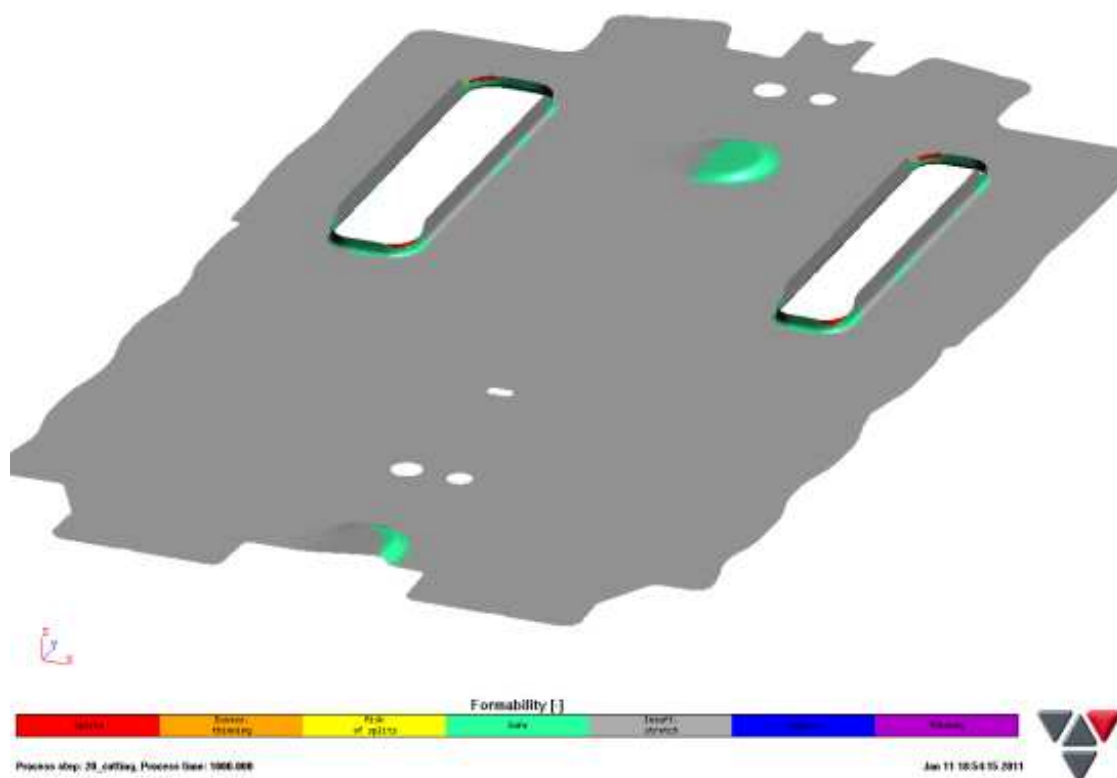


Figura 4.47 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas. após a segunda operação

As figuras 4.48 e 4.49 apresentam os valores dos esforços necessários para a realização desta operação, nomeadamente 39,6 *ton* para o corte e 12,4 *ton* para a estampagem dos embutidos e abas das janelas incluindo o esforço necessário para vencer as molas da almofada, 3 *ton*.

Os valores apresentados para o corte, 79,2 *ton* para duas peças, apresentam-se ligeiramente inferior as 91 *ton* calculadas anteriormente no capítulo 4.2.2.

Por outro lado, no que respeita aos esforços para a dobragem e embutidura da peça, a diferença registada entre os valores do capítulo 4.2.2 e esta simulação (24,8 *ton* para duas peças), poderá ser entendida por a formula utilizada no calculo considerar um forte coeficiente de segurança, daí a importância de se poder comprovar na prática estes valores.

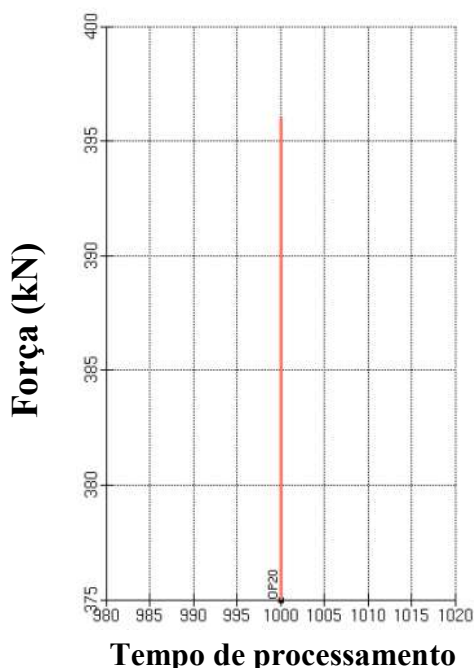


Figura 4.49 - Esforço de Corte na segunda operação

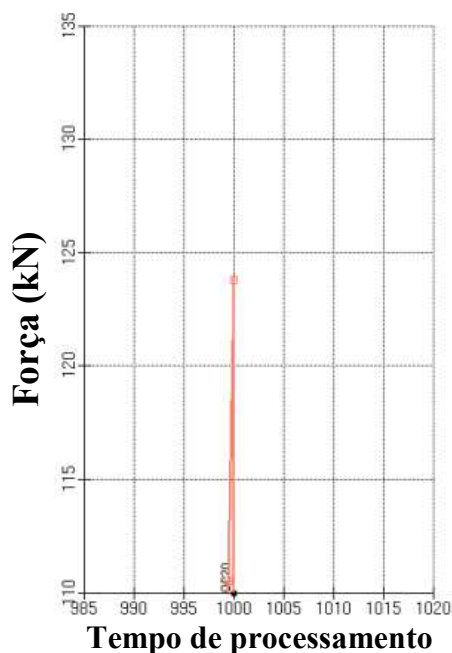


Figura 4.48 - Esforço Necessário à deformação

4.3.3.3 Terceira Operação – Estampagem das abas e das nervuras

Entre a simulação da terceira operação e a simulação realizada para a definição de contorno desta mesma operação, diferem as condições de fornecimento da chapa, nomeadamente a espessura não constante da peça, a existência das janelas já dobradas, dos embutidos já realizados e a existência de um novo componente, o pisador.

As geometrias utilizadas nesta simulação são as mesmas que se utilizaram anteriormente, na simulação de definição de contorno desta operação. Contudo devido à existência das janelas, o espaço para o seu alojamento tem de ser aberto na matriz. Devido à curvatura e à inclinação das superfícies laterais, dobradas na primeira fase da operação, o alojamento para as janelas tem que ser maior que a simples projecção da área que ocupam (figura 4.50).

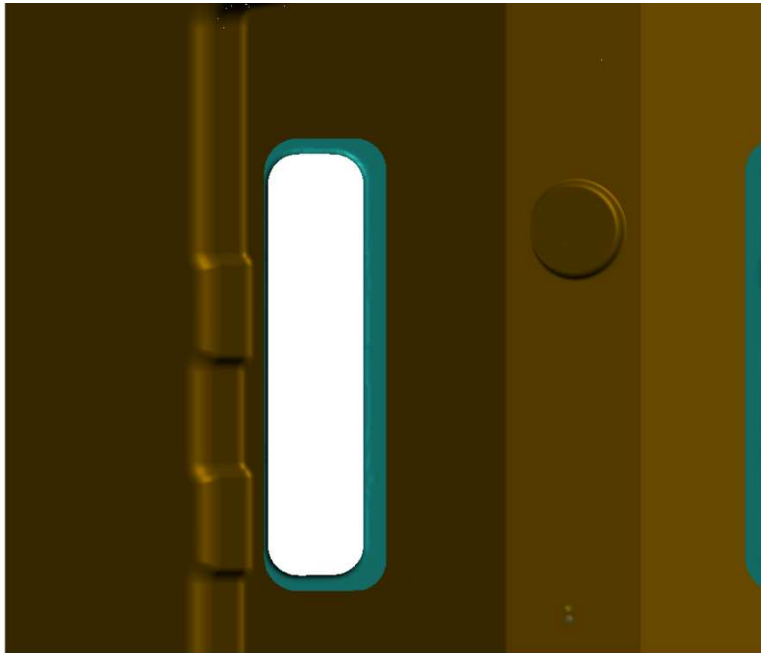


Figura 4.50 - Detalhe do aumento do espaço da matriz para a janela devido à pré-dobragem

A introdução de um pisador (figura 4.51) é feita porque na ferramenta, a peça antes de deformada entre a matriz e a almofada é presa pela parte central, tal como mostra a figura 4.19 fase 1.

Ao ser considerado o pisador é necessário alterar a sequência das etapas existentes da simulação, nomeadamente com a criação de uma nova etapa. Esta nova etapa, de aproximação, é adicionada de forma a actuar o pisador antes da matriz e para que se mova de encontro à almofada.

Concluída a simulação constata-se que, apesar de aparentemente estar de acordo com as expectativas, existem defeitos nas abas das janelas, (figura 4.52)

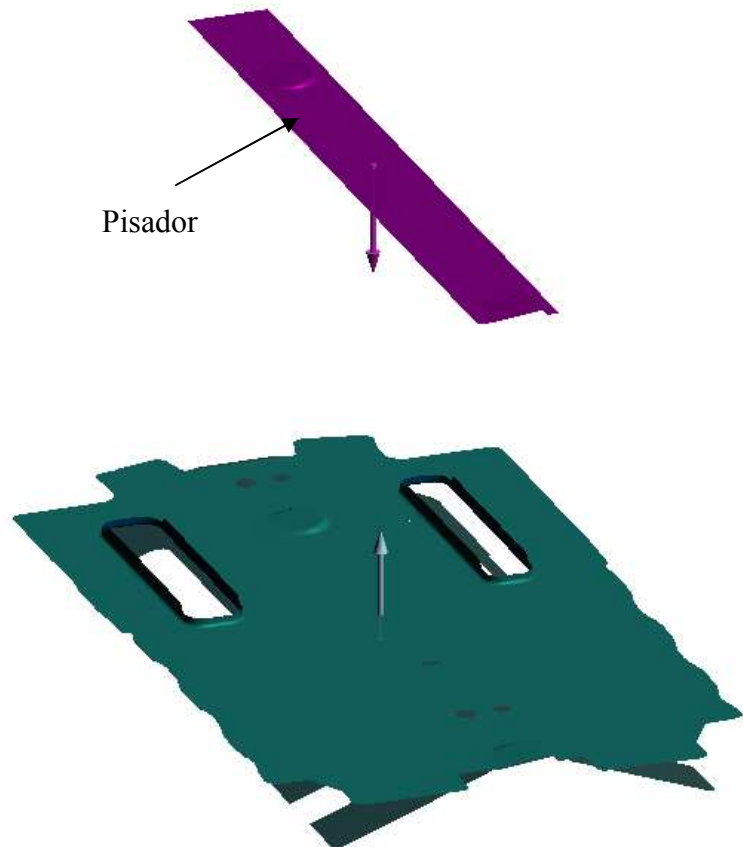


Figura 4.51- Chapa pousada na almofada

Analisando o decorrer da simulação é possível detectar o início e o desenvolver do problema (figura 4.53). O problema começa com o início da deformação da aba lateral. Esta ao ser deformada provoca o repuxe do material da base da aba. O efeito “ziguezague” deve-se à existência dos embutidos intercalados na aba

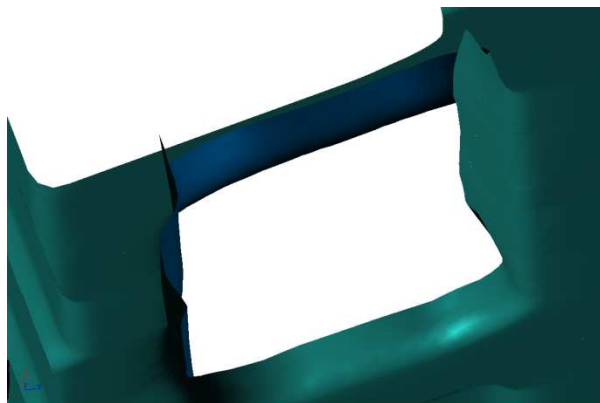


Figura 4.52 - Defeito na aba da janela



Figura 4.53 - Sequência de deformação da aba da janela

4.3.3.4 Soluções para o problema da aba das janelas

Quando foi localizado este problema, o projecto da ferramenta já se encontrava numa fase relativamente avançada. Assim, uma alteração drástica do projecto poderia resultar em prejuízos elevados. Nesse sentido procuraram-se soluções simples e que não levassem a um grande desvio no cumprimento dos prazos.

4.3.3.4.1 Alteração do posicionamento da dobragem das janelas

A primeira solução analisada foi a de passar a dobragem da aba da janela para uma operação posterior à da dobragem das abas laterais da peça, ou seja para a quarta ou quinta operação.

A colocação desta dobragem na quinta operação foi imediatamente descartada.

Nesta operação as faces já estão na vertical, obrigando a que a deformação das abas fosse feita numa direcção perpendicular ao movimento da prensa, implicando assim a incorporação de acessórios normalizados específicos para este tipo de operações. Como já estavam sendo utilizados para a realização de operações de furação nestas faces acessórios deste tipo, tal levantava graves problemas de atravancamento, que poderiam levar à necessidade de introduzir uma operação a mais na ferramenta. Tal situação era totalmente inadmissível pois as dimensões da ferramenta já ocupavam a totalidade da mesa da prensa para a qual estava destinada.

A solução de utilizar a quarta operação para o efeito em causa consistia em colocar os punções no componente onde assenta a peça e aproveitar o movimento de deformação das faces laterais da peça para realizar a dobra. O problema desta solução é que não haveria forma de pisar a peça, ou seja, de ter uma matriz que definisse por onde seria realizada a dobra da aba.

4.3.3.4.2 Redução do ângulo da pré-dobragem

Assumindo que a causa deste problema poderia ser por a peça não estar suficientemente pisada, pensou-se em reduzir o ângulo da pré-dobragem para 8° , em vez dos iniciais 20° . Desta forma a abertura na matriz seria menor, aumentando-se assim a área que calcaria a peça entre a janela e a dobra lateral e tal deveria ser suficiente para que o material não repuxasse as abas das janelas.

Com esta alteração continuaria a ser possível executar a aba com contra-saída nesta operação e as alterações ao projecto da ferramenta seriam mínimas.

Foram então feitas as alterações necessárias na geometria para preparar uma nova simulação. Para além da alteração da inclinação das faces optou-se também por criar o addendum no próprio programa de simulação, o que permitiu uma aproximação da forma ao addendum real.

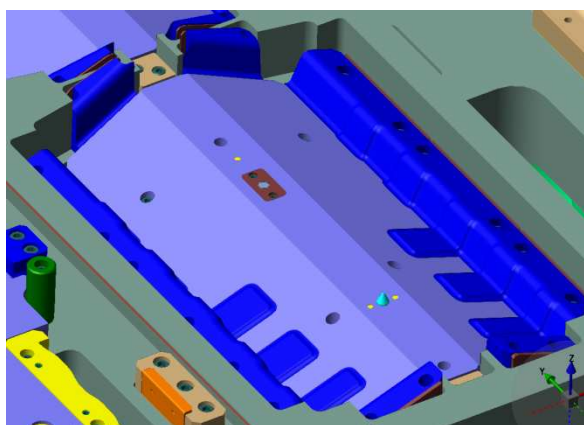


Figura 4.55 - Addendum Real

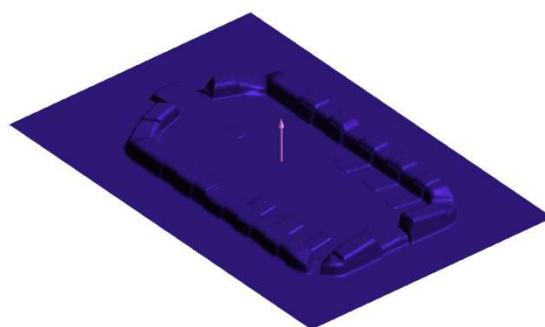


Figura 4.54 - Addendum simulado

Após a execução desta nova simulação comprovou-se que esta solução não eliminava o problema (figura 4.56).

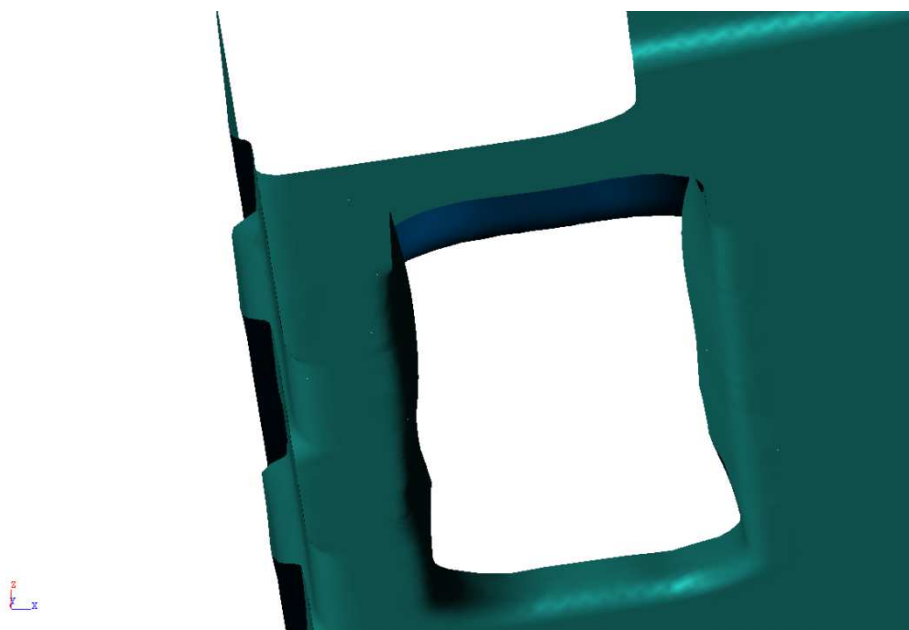


Figura 4.56 - Resultado da solução da redução do ângulo da pré-dobragem

4.3.3.4.3 Remoção da pré-dobragem

Uma vez descartadas as soluções anteriores, que inicialmente pareciam simples mas que se revelaram ou impraticáveis ou com resultados negativos decidiu-se avançar para a análise de outras soluções que obrigariam a mais trabalho sobre o projecto já realizado na ferramenta.

Analizou-se então de seguida a possibilidade de remover a pré-dobragem, passando a terceira operação a ser feita sem qualquer pré-dobragem, simultaneamente com as dobras das janelas. Isto é, seria utilizado um pisador plano em vez de possuir uma inclinação de 8 ou 20 graus.

Apesar de aparentemente simples, esta alternativa levanta algumas preocupações, por ser necessário dar um ângulo inferior a 90° à aba do topo, responsável pela existência das pré-dobragens, originando uma contra-saída.

Para ultrapassar esta dificuldade ponderou-se dobrar as abas a 90° na terceira operação, deixando para a quinta operação, através da colocação de uns postigos de calibração (figura 4.57), o acerto das abas para o ângulo pretendido.

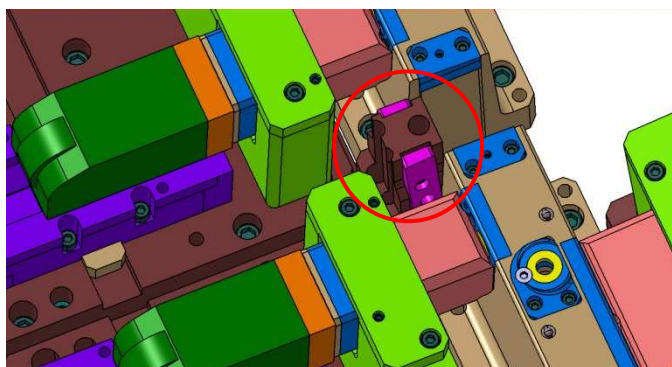


Figura 4.57 - Postigo de Calibração

Esta solução poderia ser implementada por dois processos distintos. Um processo consistiria

em realizar os embutidos e as dobras em simultâneo, e o outro processo, passaria por estampar os embutidos das superfícies laterais utilizando a força das molas da almofada seguindo-se depois a dobragem das abas laterais e das janelas.

A primeira solução reuniu um maior consenso na equipa, contudo, decidiu-se fazer novas simulações testando ambos os casos, antes de se tomar uma decisão.

Uma vez concluídas as simulações, de ambos os processos, e tendo os resultados obtidos sido semelhantes, optou-se por avançar com a primeira solução, porque a segunda opção implicava um maior esforço de molas.

Enquanto na primeira solução se poderiam manter as molas já dimensionadas na fase inicial do projecto, 3 molas de 30kN, a segunda solução implicaria a substituição destas, por molas de maior força, num esforço total de 365kN. Este valor é definido pelo próprio programa, que o considera como sendo necessário para a realização completa dos embutidos na almofada.

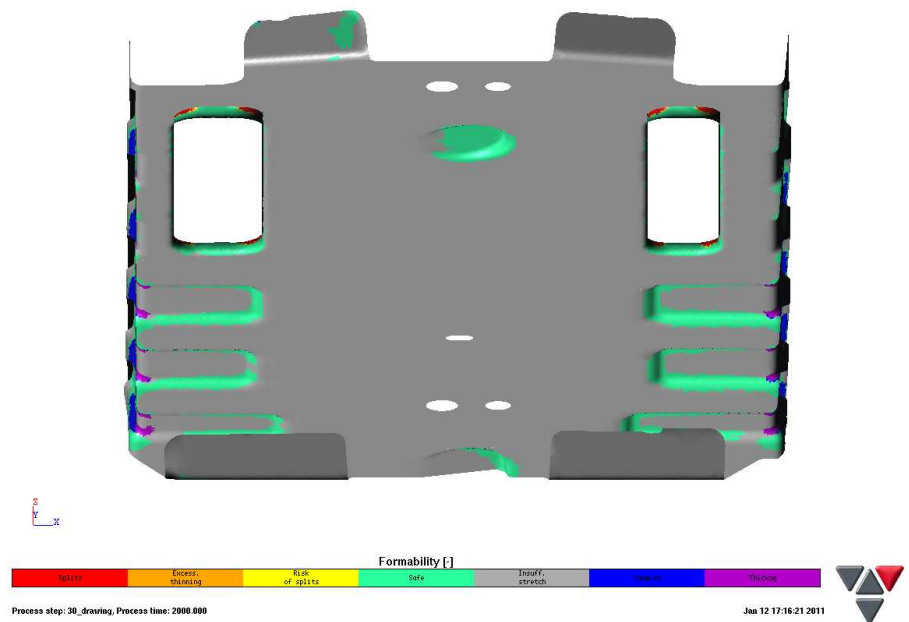


Figura 4.58 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas, após as simulações

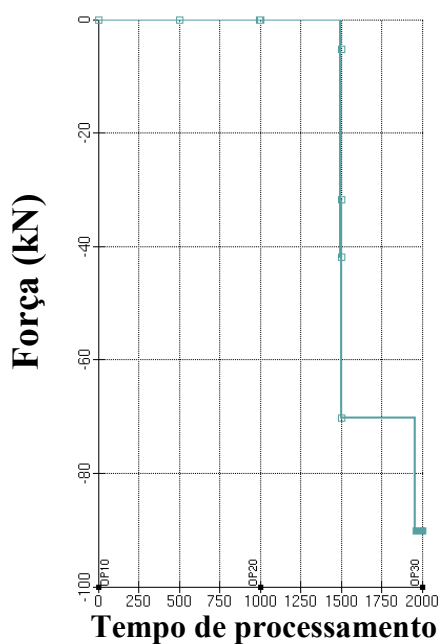


Figura 4.60 - Esforço de molas da primeira solução

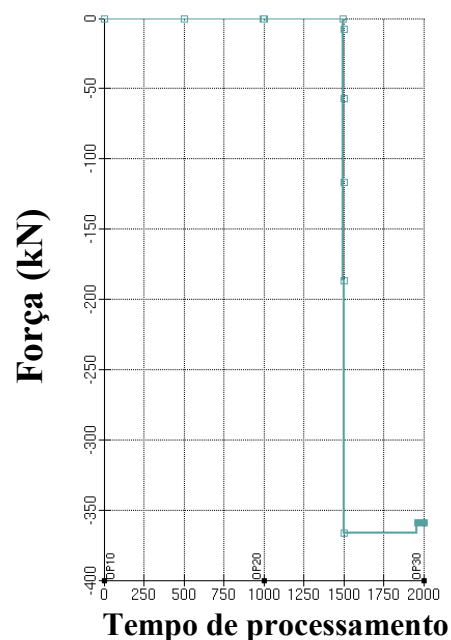


Figura 4.59 - Esforço de molas da segunda solução

4.3.3.5 Quarta Operação – Estampagem das faces laterais

Nesta operação apenas ocorre a dobragem das faces laterais, não sendo esperados qualquer tipo de defeitos. No entanto o uso da simulação permitirá saber os esforços necessários para a operação e se o dimensionamento das duas molas a gás a utilizar no pisador é suficiente.

Para além desta informação o programa de simulação permite-nos analisar o efeito do retorno elástico da peça após a sua deformação, também designado frequentemente por springback.

Esta informação é útil não só para a fase de projecto, onde os componentes da ferramenta já serão projectados tendo em conta esse retorno, como posteriormente na fase de afinação da ferramenta.

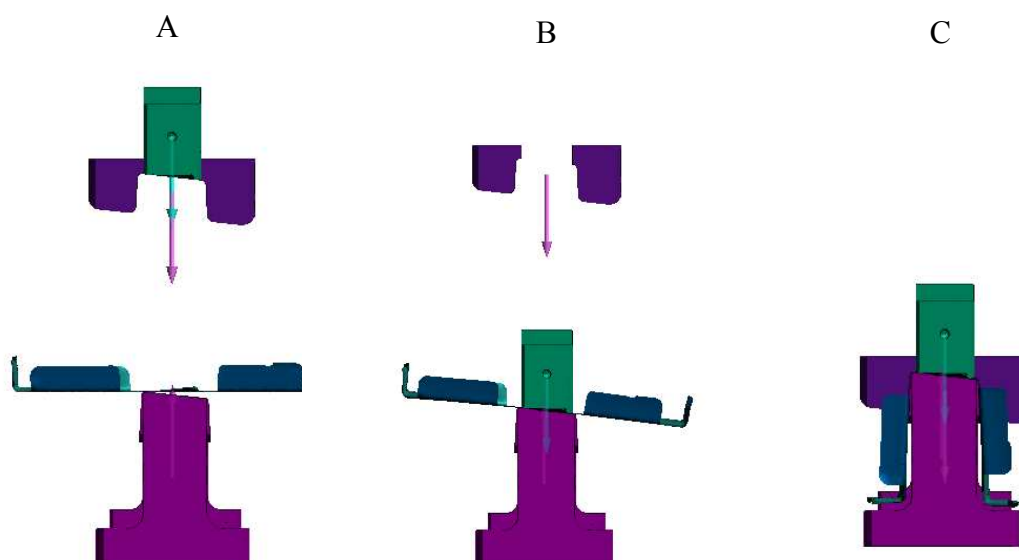


Figura 4.61- Sequência do processo da quarta operação

Nesta operação a ferramenta em vez de possuir um cerra-chapas ou almofada, possui um pisador que manterá a peça bem presa durante a dobragem.

Na definição dos parâmetros da primeira etapa da simulação (figura 4.61 B), é definido o movimento descendente do pisador, a matriz é considerada estacionária e o punção como não activo.

Na segunda etapa da simulação (figura 4.61 C) a matriz mantém-se rígida enquanto o punção inicia o movimento em direcção à peça, e o pisador é definido como responsável por executar uma força de 30 kN, 15kN por cada cilindro, no seu sentido de trabalho.

Terminada a simulação, (figura 4.62) tal como foi concebida, verifica-se que a obtenção da peça não apresenta defeitos ou situações preocupantes, passando-se então à análise do retorno elástico.

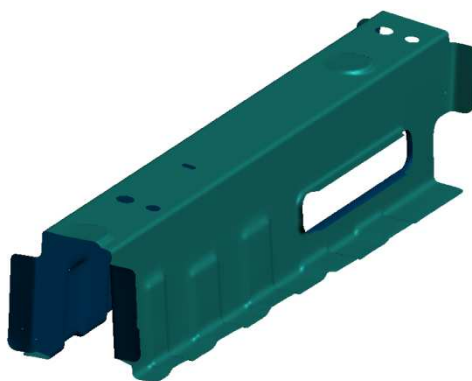


Figura 4.62 - Peça após simulação da quarta operação

4.3.3.5.1 O efeito do retorno elástico na quarta operação

Para a análise dos efeitos do retorno elástico na peça, têm de ser definidas as restrições a que está sujeita. No caso concreto, não foi imposta qualquer restrição, uma vez que se pretende analisar o retorno elástico total da peça nas condições de fornecimento da peça ao cliente.

O valor do retorno elástico é calculado pelo programa de simulação, apresentando quer o deslocamento linear que o deslocamento angular (figura 4.63).

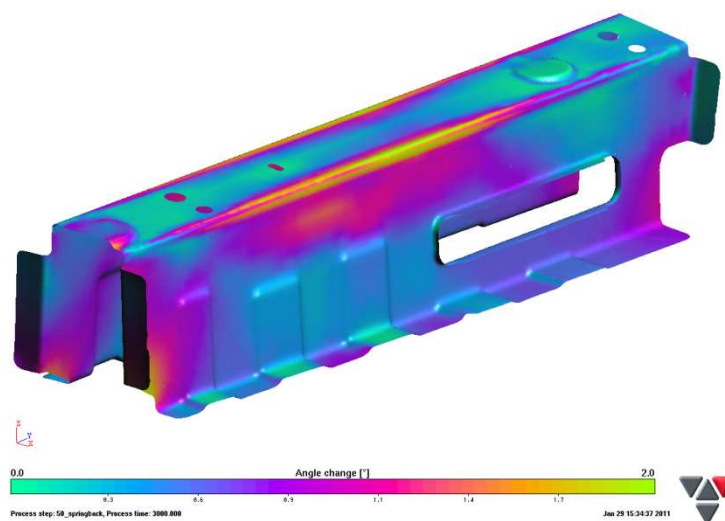


Figura 4.63 - Retorno Elástico da peça

Os resultados fornecidos pelo programa, mostram que o valor máximo do retorno elástico das superfícies laterais é de 2,4°.

Este valor será levado em consideração no projecto do punção e da matriz com correcções nos raios de cada um e no jogo entre eles, provocando-se uma ligeira redução de espessura da peça localizada na zona da dobram, criando um vinco que quebra as tensões que originam o retorno elástico.

4.3.3.6 Quinta Operação – Furação lateral e separação

Na quinta operação da ferramenta são executados alguns cortes nas superfícies laterais da peça através do uso de carros que transformam o movimento vertical descendente da ferramenta num movimento horizontal.

Através da simulação são obtidos os esforços de corte envolvidos, 17.5 ton (figura 4.64). Para duas peças o valor será de 35 ton o que coincide com os valores estimados anteriormente no capítulo 4.2.5,

No entanto, porque foram utilizados carros para executar estes cortes, o esforço necessário da prensa é maior que o estipulado pelo programa, porque este não considera as perdas de força que se verificam com a utilização dos carros.

Como existem vários modelos de carros, dispondo de diferentes ângulos de inclinação do plano as forças resultantes variam, pelo que a sua selecção é efectuada pelo projectista da ferramenta.

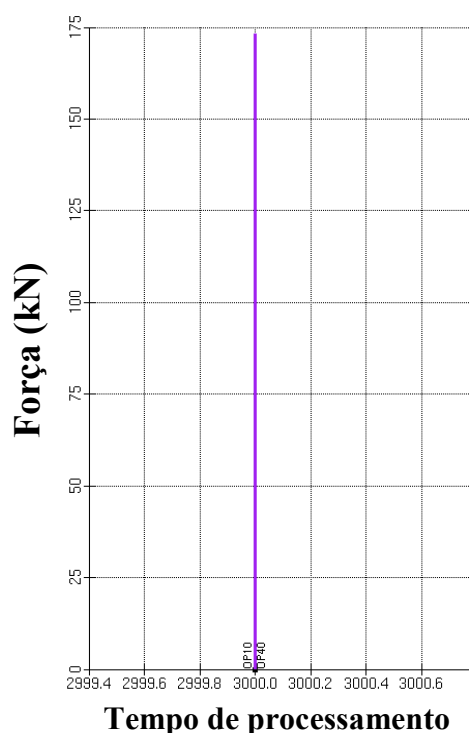


Figura 4.64 - Esforços de corte da quinta operação

4.3.4 Solicitação de uma modificação na peça

Raramente acontece, neste sector industrial, que a peça final a produzir coincida com a peça que deu origem a todo o processo de desenvolvimento.

As modificações surgem inopinadamente, podendo ser de pequena importância, como é o caso de variações de raios, ou levando muitas vezes ao reinício de todo o projecto da ferramenta.

Estas modificações podem acontecer pelos mais diversos motivos. Uma vez são os clientes, que já depois da peça negociada necessitam de a alterar, e outras, é o próprio fabricante da ferramenta que na fase do projecto se depara com dificuldades na obtenção da peça e solicita essas alterações. Os custos envolvidos nestas situações são normalmente da responsabilidade de quem as solicita.

No decorrer deste projecto, e numa fase já bastante adiantada, foi solicitada uma modificação, pelo cliente final, que consistia na introdução de dois embutidos em cada superfície lateral junto a um dos embutidos já existentes, conforme mostra a figura 4.65.



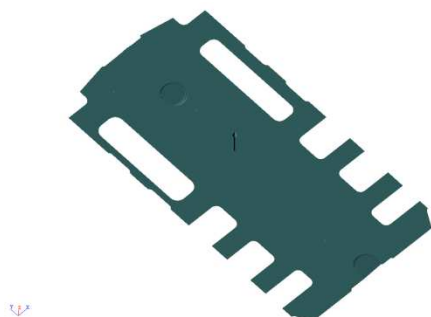
4.3.4.1 Análise de diferentes soluções e correspondentes resultados

Após análise da modificação solicitada foram discutidas três hipóteses de implementação da mesma, e foi também estudada a possível apresentação de uma alternativa à alteração solicitada pelo cliente, que no ponto de vista do construtor da ferramenta poderia ser mais favorável para o projecto.

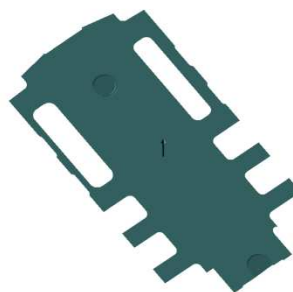
A primeira hipótese consistia na adição dos novos embutidos, usando um processo simples que passa pela criação dos respectivos punções e matrizes de estampagem introduzindo-os na terceira operação, e trabalhando em simultâneo com os outros punções, responsáveis pela dobragem das abas e criação dos embutidos nas superfícies laterais.

Desta forma o processo manter-se-ia inalterável.

No entanto, a adição destes punções implicaria a remoção de parte considerável da almofada, responsável por segurar a peça, como se pode constatar pela comparação das figuras 4.66 e 4.67, o que deixa adivinhar um enrugamento da peça nesta zona.



existente



a para efectuar

A simulação realizada para análise desta solução não revelou contudo, ao contrário do esperado, qualquer enrugamento na zona não pisada da peça (figura 4.68).

No entanto a experiência da equipa aconselhou a que esta solução fosse descartada por se considerarem pouco prováveis os resultados da simulação.

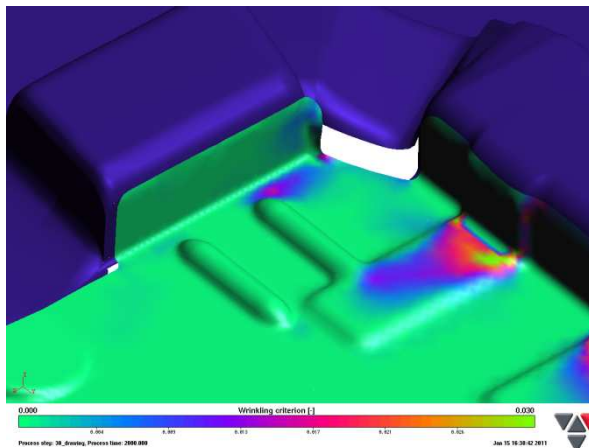


Figura 4.68 - Qualidade superficial da peça

A segunda possível solução avançada para introduzir a modificação pretendida passa por efectuar os novos embutidos na própria almofada.

Esta solução implicaria no entanto um aumento do esforço das molas da almofada e consequente substituição por outras de maior capacidade, contudo permitiria a estampagem sem remoção de nenhuma parte da almofada.

Todavia, apesar das considerações anteriores, esta solução apresenta a vantagem de no caso que não se obtivessem os resultados pretendidos, seria possível corrigir facilmente a almofada, na ferramentaria, e passar para a hipótese anterior sem grandes custos ou complicações.

Após a realização da simulação para análise desta segunda opção, observou-se que no decorrer do processo, nomeadamente quando os novos embutidos são conformados pela almofada, existe um enrugamento do material (Figura 4.69) Este enrugamento é originado

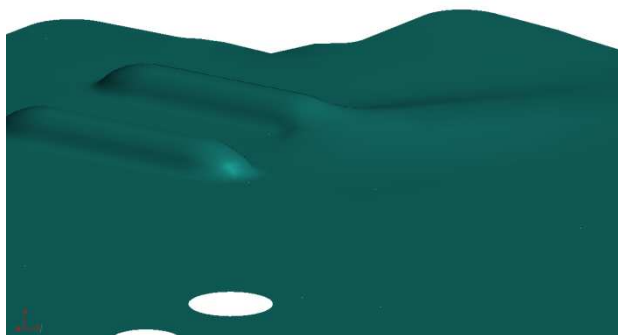
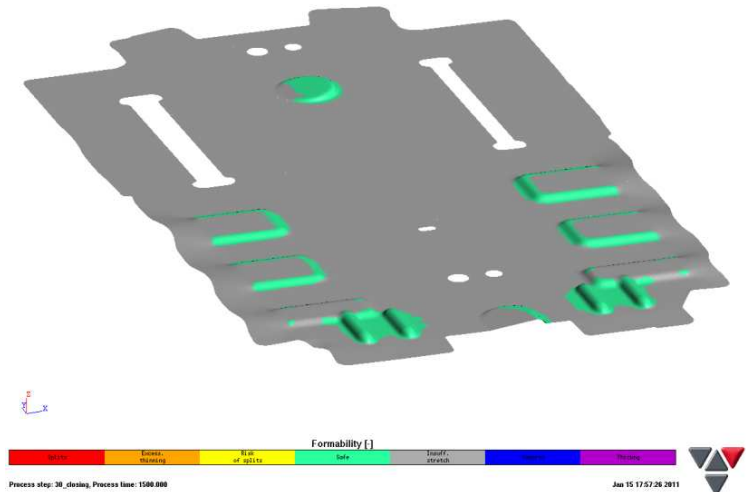


Figura 4.69 - Enrugamento observado após a realização dos novos embutidos na almofada

pelo facto da peça não estar pisada na zona consequente ao embutido, devido ao espaço existente para a passagem dos punções.

Apesar de no final da simulação da operação não existir qualquer indício de problema na qualidade da peça, considerou-se ser elevado o risco desta solução, por receio de que uma a ferramenta na prensa, o enrugamento não



tivesse condições de escoamento e fosse sim esmagado.

Figura 4.70 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas, após primeiras estampagens na almofada

A terceira solução avançada para simulação, dado o aparente fracasso das anteriores, considera a estampagem simultânea, na almofada, dos novos embutidos e dos já existentes nas superfícies laterais, sendo então a peça totalmente pisada, durante todo o processo.

Da informação obtida no software de simulação, para a realização completa destes embutidos, na almofada, são necessários pouco mais de 500 kN. Ora, estando já o projecto com 3 molas, num total de 90kN, os embutidos não serão totalmente estampados na almofada, a menos que se substituíssem as molas, será sim dada uma primeira conformação aos embutidos. Deste modo a peça estará presa e a estampagem será sempre acompanhada.

Dados os resultados obtidos nesta terceira solução, considerou-se ser este o processo a seguir.

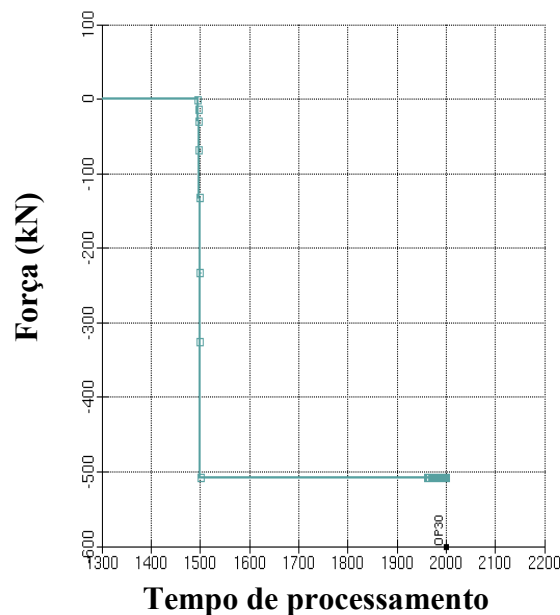


Figura 4.71 - Força de molas necessária

4.3.4.2 Proposta de alteração da peça

Em reforço da decisão tomada foi decidido analisar as espessuras da peça nas zonas modificadas.

Esta análise revelou reduções de espessura na zona dos novos embutidos, (Figura 4.72), para valores à volta de 1mm.

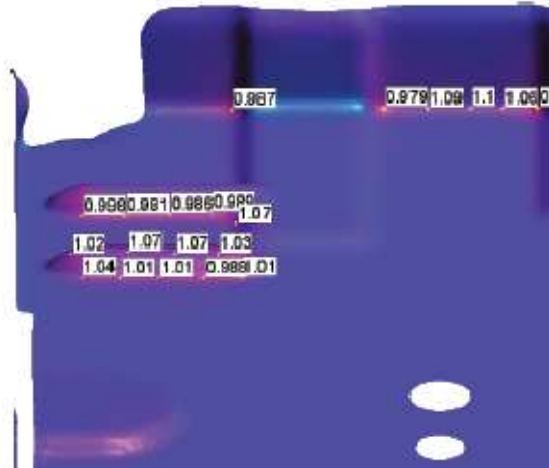


Figura 4.72 - Espessuras obtidas nos novos embutidos

Com o intuito de facilitar a estampagem da peça e obter melhores resultados, projectou-se uma alteração à modificação do cliente.

Caso esta hipótese se mostre favorável avançar-se-á com a sua negociação.

A alteração consistia, como mostra a figura 4.73, no prolongamento do embutido já existente para a zona onde o cliente pretendia os novos embutidos.

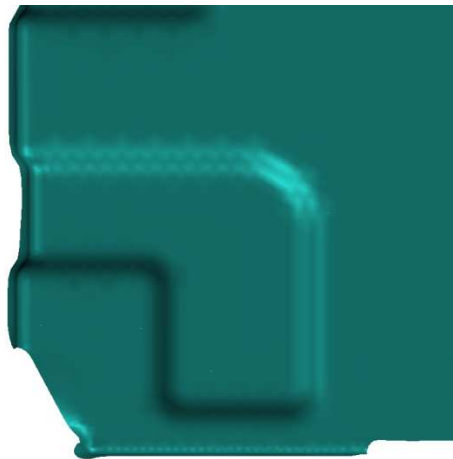


Figura 4.73 - Proposta Gestamp Aveiro

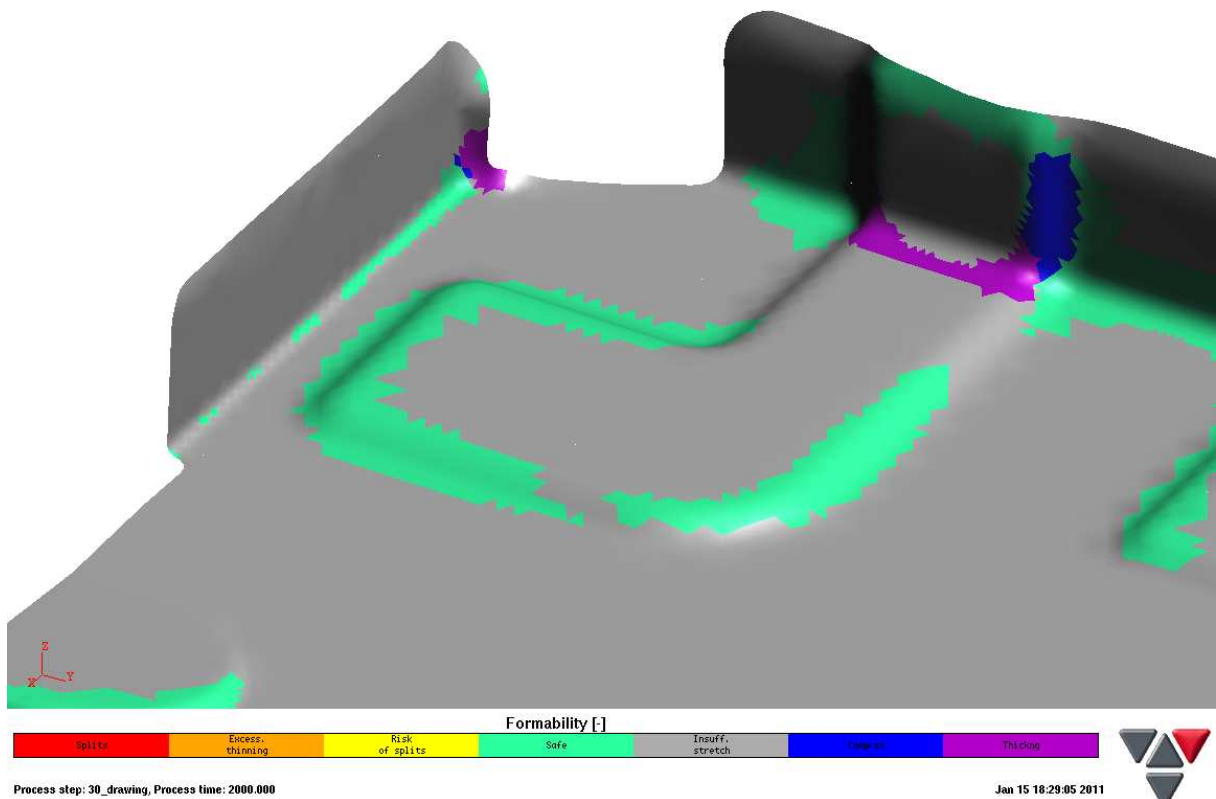


Figura 4.74 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas da peça proposta pela Gestamp Aveiro

Os resultados mostram-se bastante bons. O embutido a propor é estampado sem problemas, apresentando espessuras próximas da espessura nominal da peça (figura 4.75).

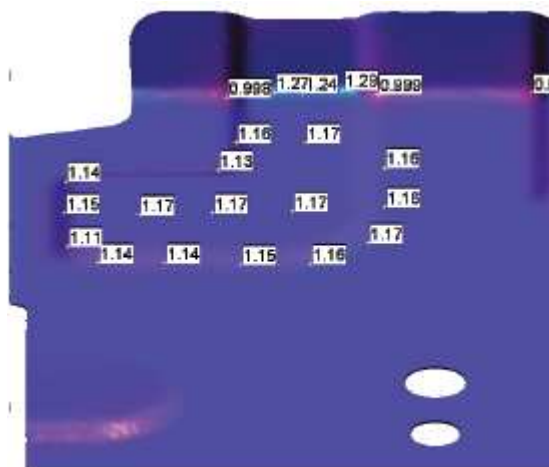


Figura 4.75 - Espessuras obtidas na proposta de modificação

5 Uso do Método dos Elementos Finitos para aprovação do processo de embutidura de uma peça

A peça, apresentada na Figura 5.1 é um componente a aplicar em portas de um automóvel.

O objectivo deste estudo é definir as condições para obter uma peça direita e uma peça esquerda por embutidura, numa só operação.

Por isso, não serão consideradas nas simulações as correspondentes operações de corte do contorno, nem das furações, a executar nas operações posteriores.

O estudo do desenho da peça revela algumas situações problemáticas para o sucesso da operação. A existência de um embutido tão profundo ao longo da peça, tipo nervura, como mostra a figura da peça, leva a crer que este funcione como um freio ao fluxo da chapa e condicione toda a sua estampagem.



Figura 5.1 - Peça 914+915

A peça apresenta um atravancamento geral de $662 \times 173 \text{ mm}$ e cerca de 16 mm de altura.

A chapa a utilizar para a fabricação deste componente é um aço de alto limite elástico, com a designação de DP590 e uma espessura de $1,17 \text{ mm}$.

O recurso à simulação para definir o processo de embutidura da peça, tal como referido atrás, é muito útil, não só pela análise de viabilidade mas também para comprovar o posicionamento das duas peças, esquerda e direita, uma em relação à outra, na ferramenta de estampar.

Tal disposição influenciará as dimensões do formato da chapa e consequentemente o consumo de material.

Devido aos vários planos não paralelos da peça, há que definir em que posição deve estar para que a estampagem seja feita sem qualquer contra-saída. Para isso recorre-se ao software de simulação que de uma forma instantânea determina a melhor maneira de o fazer.

O posicionamento dado à peça para a estampagem sem contra-saídas coloca os planos onde estão localizadas as furações num plano que não está perpendicular ao movimento vertical da corrediça da prensa, o que obrigará a algumas soluções de recurso para a execução dos furos.

Tendo em conta o processo de alimentação da peça, que se quer sempre pelo processo mais simples, procura-se uma solução na qual a ferramenta possa ser alimentada com chapa em bobine, evitando-se assim um sobrecusto agregado à operação de corte dos formatos e manuseamentos.

Para alcançar tal objectivo, as peças têm que ser estampadas unidas.

5.1 Peças esquerda e direita, ligadas por uma superfície longitudinal

Com as peças ligadas, como apresentado na figura 5.2, a principal vantagem ocorrerá posteriormente nas operações de furação.

Os furos existentes nos extremos de cada peça serão usados para guiamento durante as operações seguintes. Estes furos, têm de ser obrigatoriamente feitos perpendicularmente com a sua superfície. Ora, não estando as suas superfícies paralelas ao cabeçote da prensa são necessários carros aéreos cuja colocação é feita nos extremos da ferramenta, o que facilita a sua implantação.

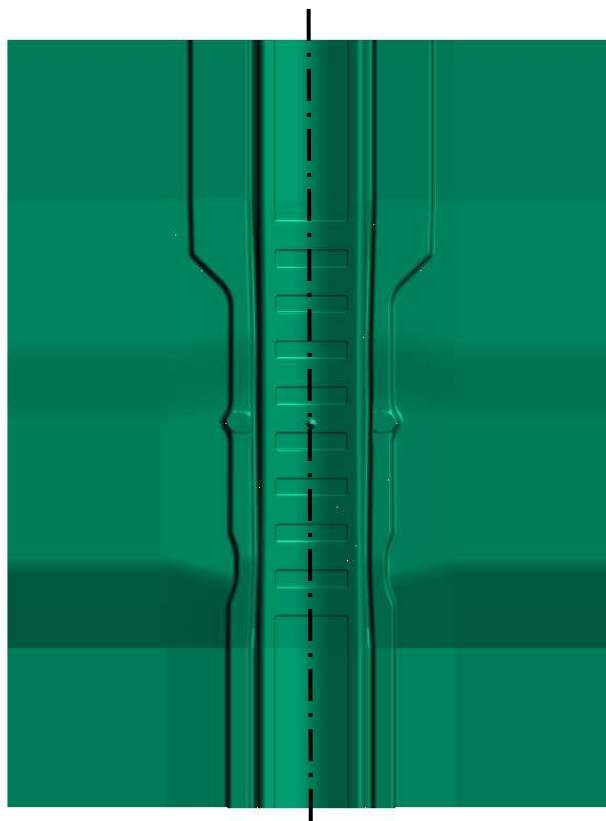


Figura 5.2 - Punção utilizado na opção das peças ligadas por uma superfície longitudinal

Os resultados obtidos na simulação apresentam elevadas zonas de risco de fissura e mesmo fissuras.

Estes resultados não são surpreendentes, a forma como as peças estão ligadas não permite o escoamento do material, proveniente do lado interior da chapa já que esta é traccionada devido à igual deformação de ambas as peças.

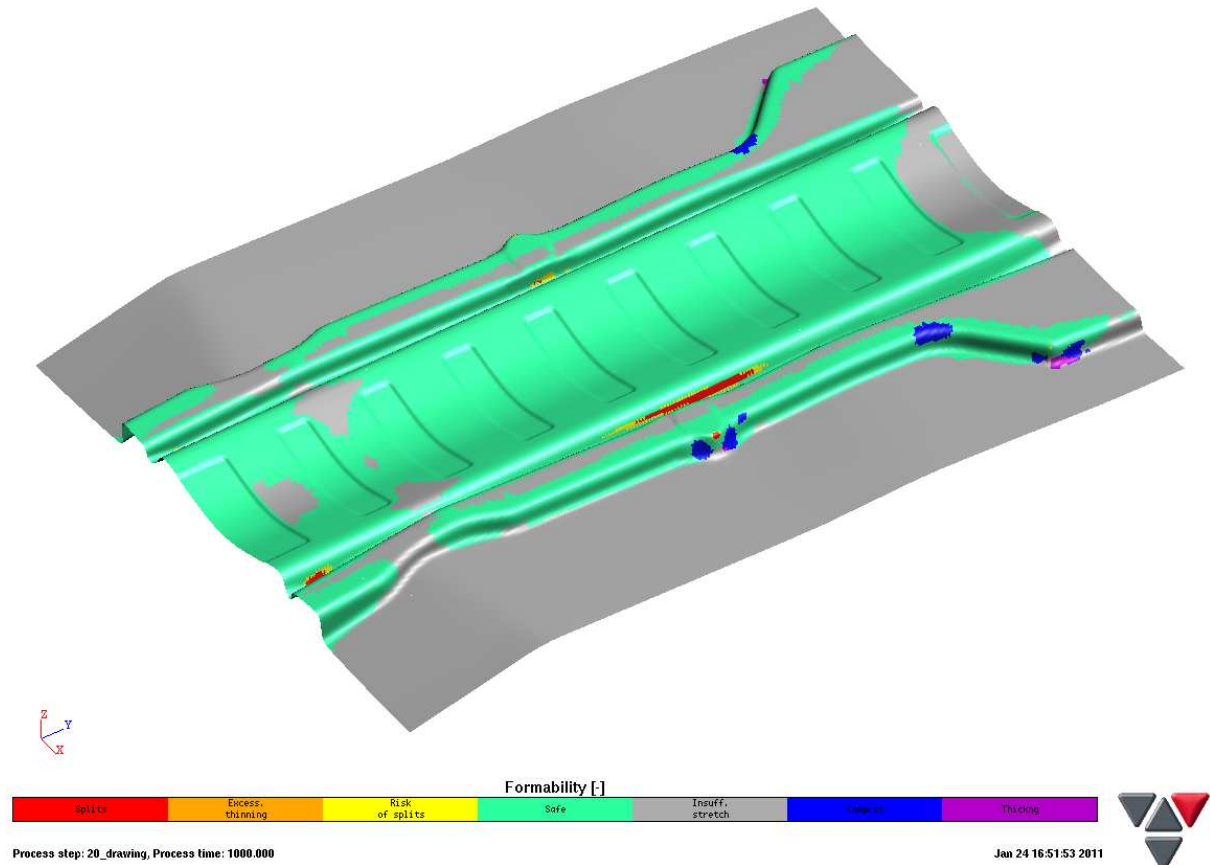


Figura 5.3 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas

5.2 Peças esquerda e direita, ligadas por uma superfície transversal

Com este processo, continua a ser possível a alimentação da chapa a partir de bobine, tendo como inconveniente a dificuldade de colocação dos carros aéreos para execução dos furos na zona de ligação das duas peças.

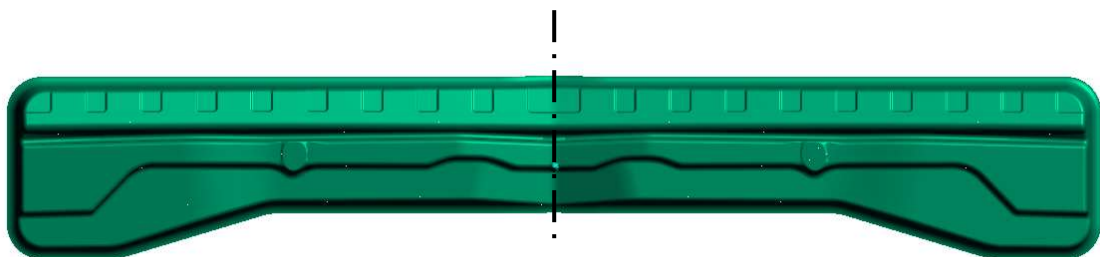
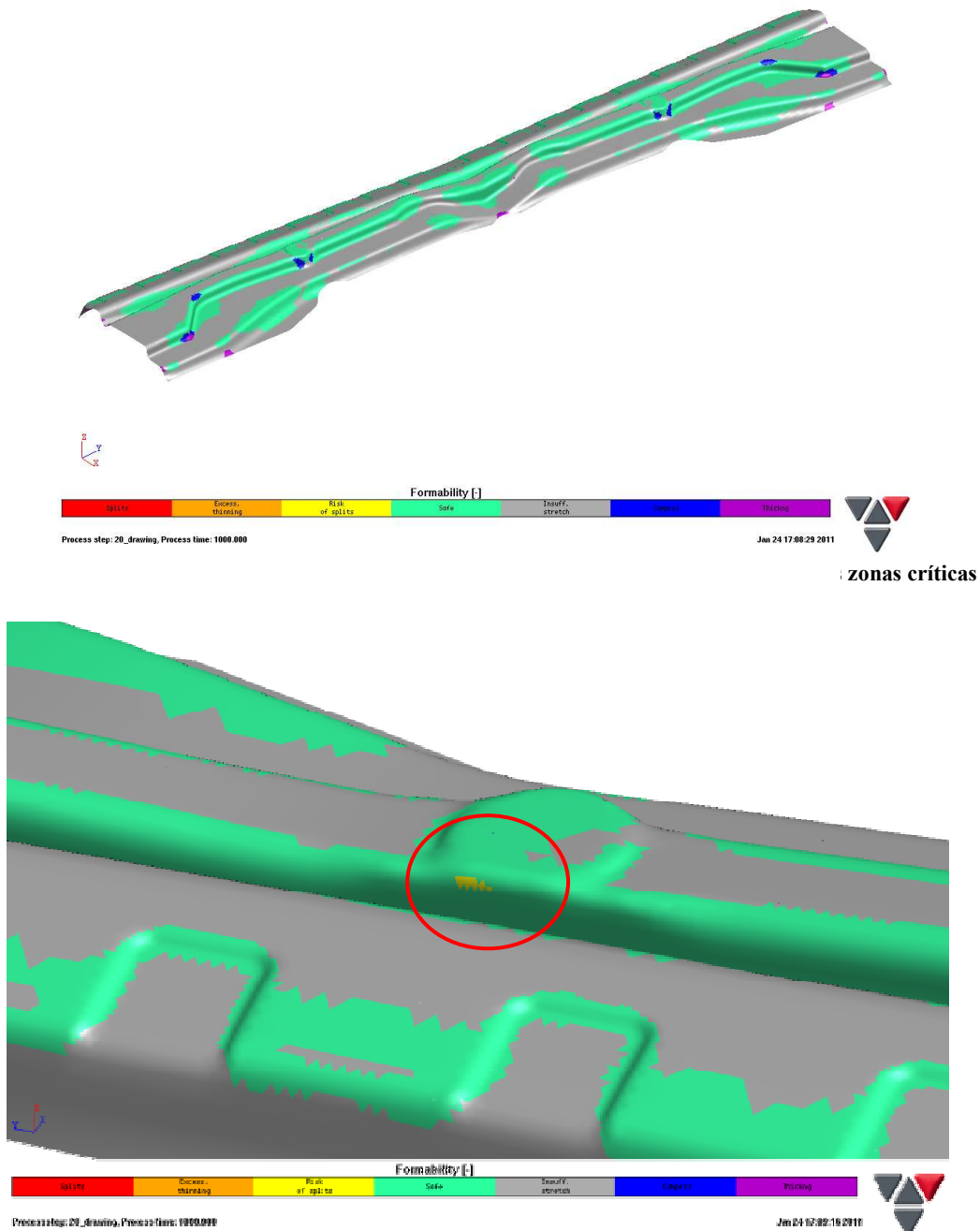


Figura 5.4 - Punção utilizado na opção das peças ligadas por uma superfície transversal

Os resultados obtidos nesta simulação são bastante melhores que os anteriores, não havendo qualquer indicação de fissura, e mesmo a indicação de risco de fissura é praticamente inexistente, aparecendo apenas numa zona da peça, conforme se assinala na figura 5.6.

Para estes resultados contribui o facto de a peça estar livre longitudinalmente, havendo então material que se pode escoar a partir daí, não obrigando a que todo o material seja deslocado do lado contrário. Deste modo reduziram-se os problemas existentes no estudo anterior.

No entanto, devido à complexidade da peça, a indicação do risco de fissura não deixa de ser preocupante, mas por se tratar de um problema localizado e não ser demasiado prolongado é possível solicitar ao cliente final da peça, uma alteração do raio envolvido para facilitar o processo.



5.2.1 Proposta de alteração de raio de concordância

Como referido anteriormente as alterações de peças no sector automóvel estão sujeitas a procedimentos rigorosos, mais ou menos demorados, e nem sempre bem sucedidos, o que quando coincide com projectos já em avanço estado de desenvolvimento pode acarretar atrasos e custos desnecessários.

Perante os resultados obtidos nas simulações anteriores e uma vez que existe um problema perfeitamente identificado é de todo aconselhável avançar de imediato com uma proposta de correcção e modificação da peça, de modo a evitar todos os inconvenientes referidos.

Para fundamentar a solicitação de modificação da peça, no raio da zona com risco de fissura, avançam novas simulações com diferentes valores de raio.

Um benefício que o uso de um software de simulação disponibiliza é permitir a alteração do desenho a 3D fornecido no início da simulação, sendo assim desnecessário obrigar o projectista a alterar um desenho 3D, a configuração de nova simulação, verificação dos resultados e tornar a corrigir se necessário. Com a utilização do software este processo iterativo fica mais uma vez reduzido basicamente ao tempo da simulação.

É pois apenas necessário escolher a superfície que se pretende alterar e definir o valor do novo raio. A alteração é feita de imediato e não obriga a nova configuração da simulação pois todo o processo se mantém, visto que não houve entrada de qualquer nova geometria, apenas é feita actualização da actual. Caso os resultados obtidos não sejam do agrado facilmente se simula com um novo valor.

É então medido o raio que se verifica estar com 3,66 mm. Dado o conhecimento prático dos projectistas perante este tipo de situações, decidiu-se aumentar para 5 mm o raio da peça na zona em questão, e verificar os resultados.

Como se pode ver pela figura 5.7 os resultados já são satisfatórias deixando de haver risco de qualquer fissura, nem havendo a existência de qualquer novo problema.

Apesar deste resultado ser positivo, esta alteração ainda tem de ser aprovada, ora, apesar da facilidade de alterar este aspecto na peça, esta alteração pode ter consequências para o conjunto, ou seja, para a montagem deste componente com outros, daí que muitas vezes os responsáveis pela peça sejam relutantes em aceitar modificações, tanto mais que tal implica modificações e actualizações de desenhos e informações técnicas da peça.

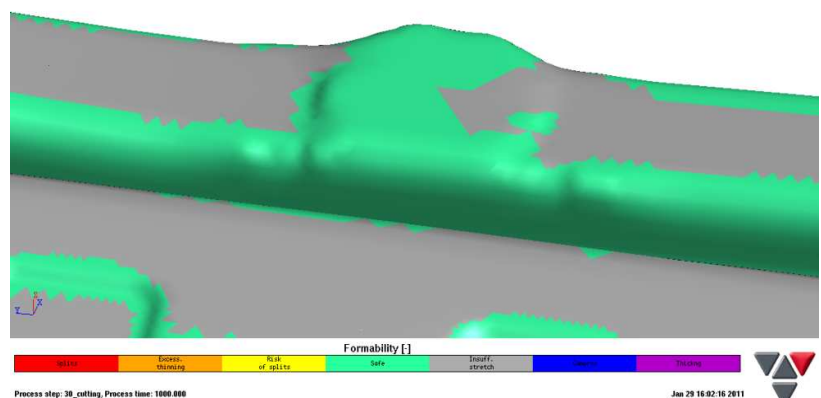


Figura 5.7 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas após alteração do raio de concordância

6 Validação dos Resultados Numéricos

No sentido de validar os resultados obtidos numericamente, procede-se a algumas simulações de um componente figura 6.1, mostrando posteriormente fotos e alguma informação de peças protótipo obtidas em testes práticos, podendo-se assim comparar os resultados da simulação com os reais.

O componente apresentado nesta validação foi escolhido por ter sido testado o seu processo não só em simulações numéricas como também experimentalmente, no entanto por não ter sido possível o acompanhamento da fase de testes, a informação apresentada não é muito detalhada.

O componente em questão é um suporte da suspensão de um automóvel e é estampado com uma chapa, de qualidade segundo norma francesa HR60, de 2,5 *mm* de espessura.

O trabalho desenvolvido acerca de este componente foi para apoio à decisão do processo de embutidura a seguir.

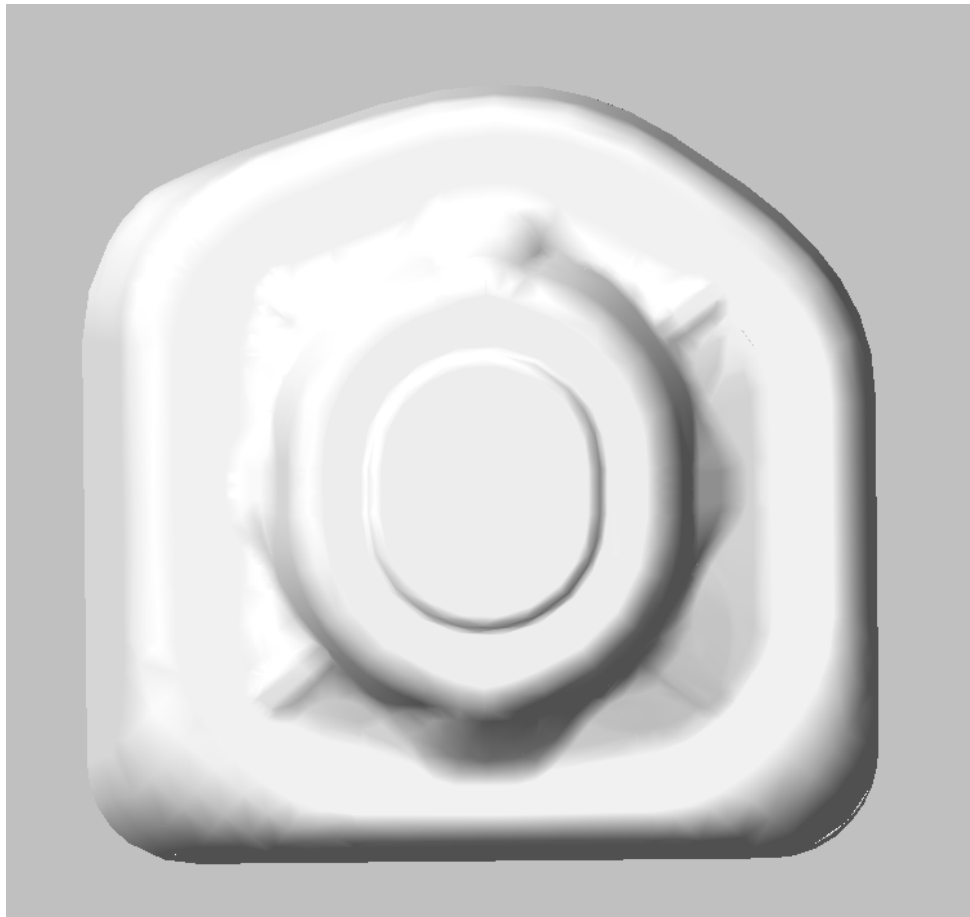


Figura 6.1 - Desenho 3D da peça

6.1 Estampagem Directa com Almofada

Dentro das possibilidades existentes para obter a peça, optou-se por iniciar a análise do comportamento da peça utilizando um processo de estampagem directa com almofada.

A peça é colocada sobre a almofada que a mantém pressionada contra a matriz, permitindo acompanhar o escoamento da chapa ao longo da estampagem.

6.1.1 Resultados da Simulação

Os resultados gerais da peça apresentam alguns riscos de fissura (zonas a amarelo) assim como uma tendência de rugas considerável.

Devem ser verificadas também neste caso, as espessuras que o programa define como finais nas zonas de maior importância da peça.

Os valores apresentados na figura 6.3 apresentam um valor médio de espessura de 2,18 *mm*.

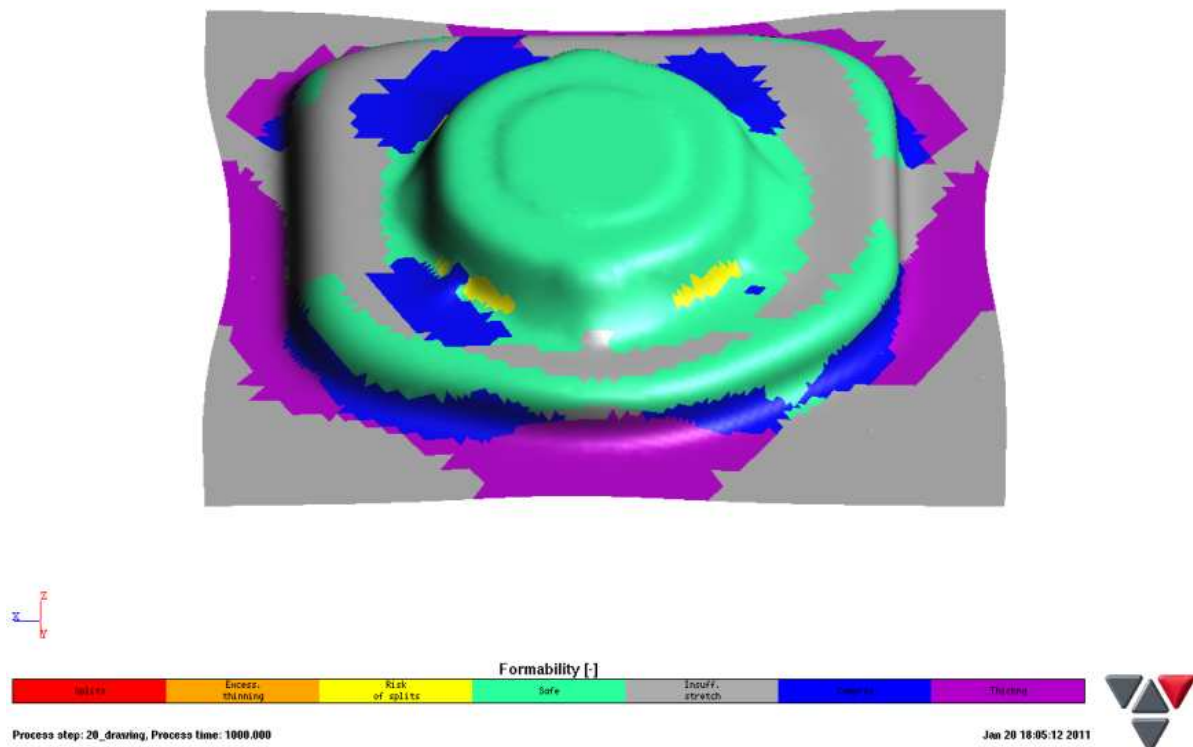


Figura 6.2 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas

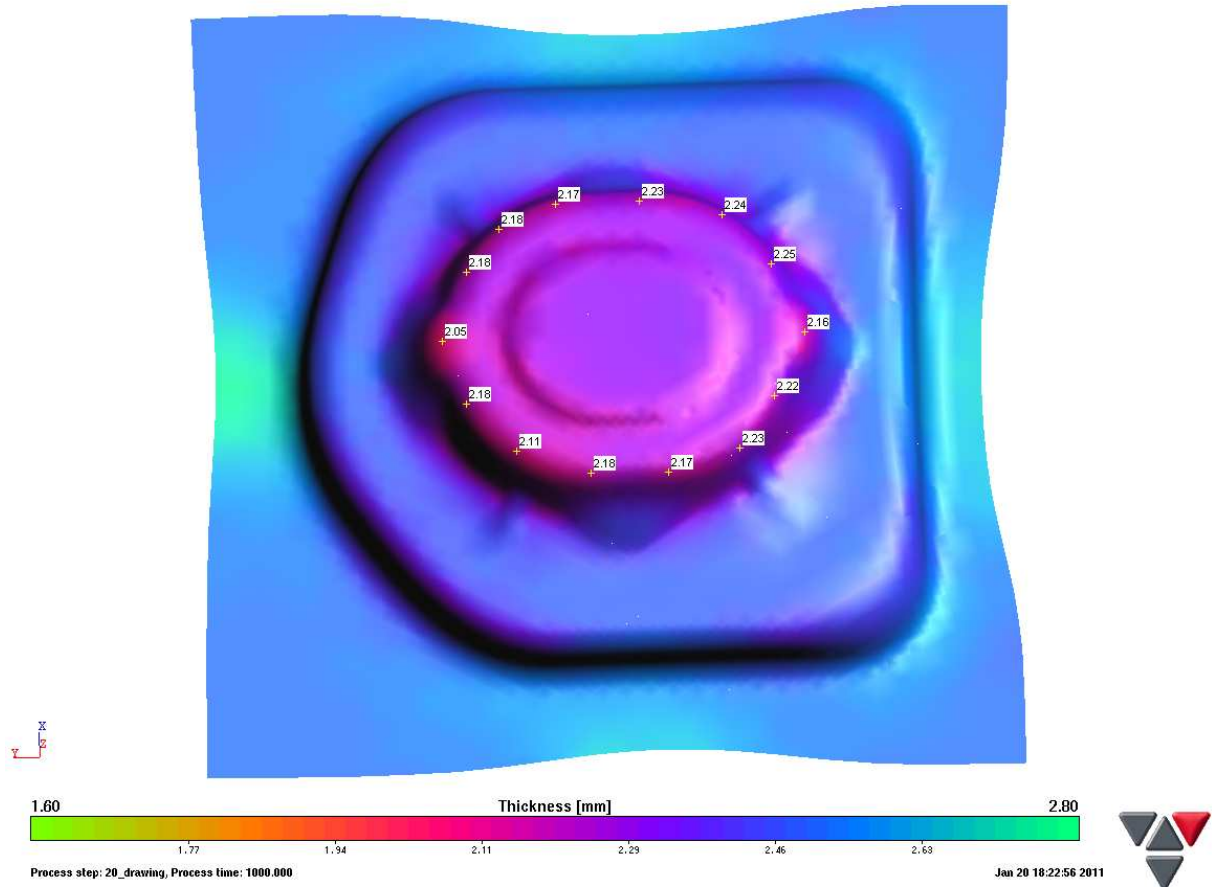


Figura 6.3 - Medição de espessuras da peça

6.1.2 Resultados do ensaio experimental

Os resultados práticos foram executados pelo construtor da ferramenta, neste caso específico, externo à empresa.

Com a necessidade de testar o processo e perante a inexistência de qualquer ferramenta, foi criado um punção, matriz e almofada que pudessem executar os ensaios e que posteriormente, caso se verificassem eficazes, pudessem ser utilizados na ferramenta final.



Figura 6.4 - Punção do ensaio experimental



Figura 6.5 - Matriz do ensaio experimental

Os resultados obtidos figura 6.6 comprovam os resultados da simulação.

Na zona apontada pela simulação com risco de fissura, verificou-se na peça de ensaio o início de uma fissura.

Quando comparada a espessura média da simulação com a obtida no ensaio verifica-se alguma discrepância. A espessura média obtida no ensaio foi de 1,66 mm.

Tal diferença pode ser justificada por algumas variáveis do processo não serem controladas pela simulação, ou pressupostos do software, aos quais o utilizador não tem qualquer acesso.

A velocidade do processo é também um factor importante para a execução da peça, e certamente existem diferenças da velocidade considerada pelo software e a utilizada no teste.

Por outro lado, o material que enquanto no programa trabalha com valores óptimos e teóricos, no ensaio as suas características varia dentro de uma determinada gama, como qualquer material.

Também não existem registos de qualquer controlo dimensional que tenha sido levado a cabo sobre os componentes da ferramenta de ensaio, para além de não haver registo das condições de lubrificação.



Figura 6.6 - Peça obtida no ensaio

6.2 Estampagem em duas operações com almofada

Neste processo a coroa é estampada numa primeira operação, e numa segunda é estampado o corpo. Em ambos os casos a estampagem é acompanhada por almofada tal como no caso anterior.

Este processo vem no sentido de melhorar os resultados da tentativa anterior. O facto de apenas ser estampada a coroa numa primeira operação, permite um mais fácil escoamento do material para esta zona. Pretende-se com isto eliminar as possíveis fissuras e também a elevada redução de espessura.

6.2.1 Resultados da Simulação

Os resultados obtidos pela simulação para este processo são substancialmente melhores. Os riscos de fissura desapareceram, dando lugar a uma deformação plástica segura.

Quanto à espessura média obtida, esta não varia muito face à simulação anterior, 2,17 mm.

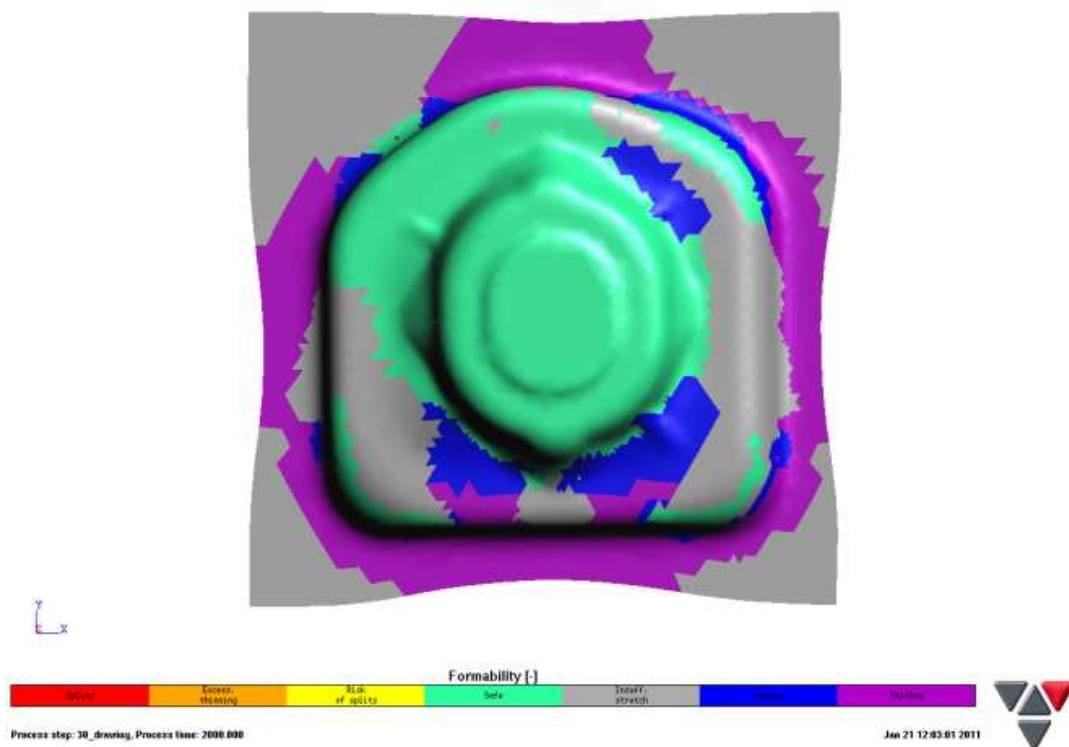


Figura 6.7 - Contorno representativo dos limites de formabilidade da peça e respectivas zonas críticas

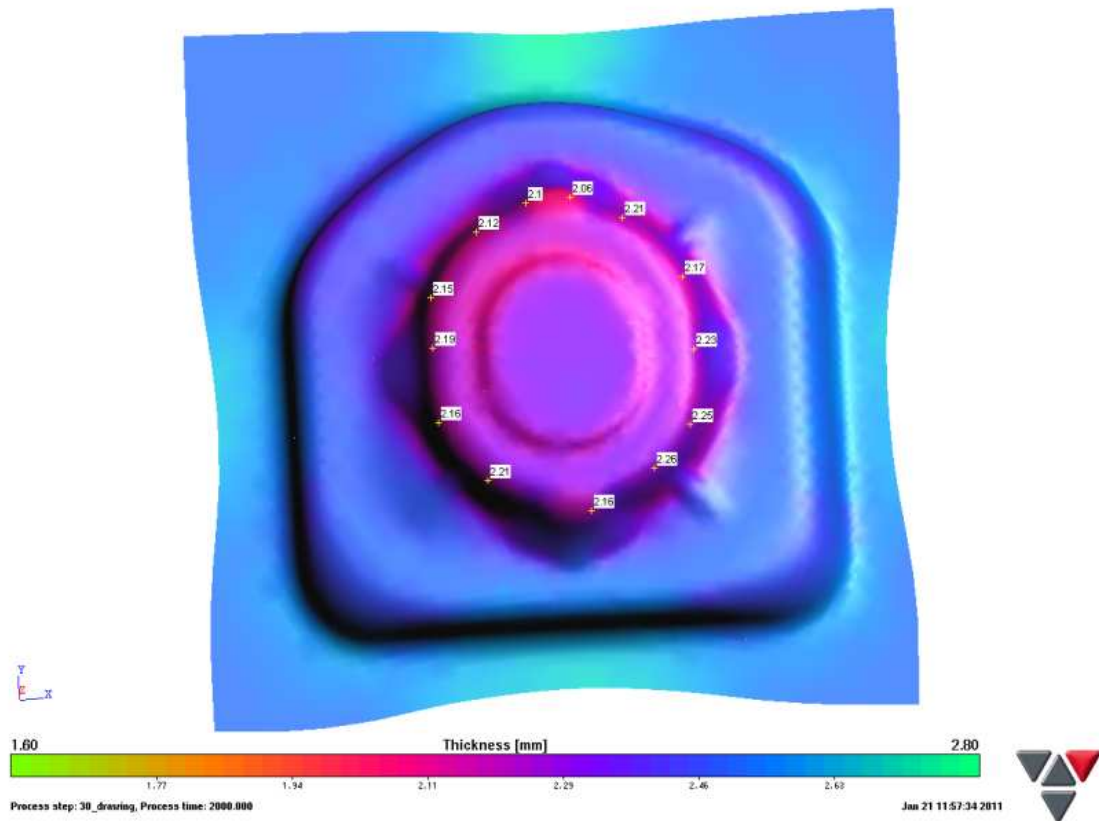


Figura 6.8 - Medição de espessuras da peça

6.2.2 Resultados do Ensaio

A forma como estes resultados práticos foram obtidos mantém a filosofia do processo anterior, com as devidas alterações.

Os resultados obtidos (figura 6.9) demonstram o sucesso deste novo processo e comprovam os resultados obtidos pela simulação. A peça não apresenta qualquer fissura ou sequer indícios de que tal possa ocorrer. Além disso a espessura média obtida, 2,13 mm, aproxima-se agora mais da obtida na simulação.



Figura 6.9 - Peça obtida no ensaio

6.2.3 Conclusões

Deste capítulo pode-se concluir que a utilização das simulações é muito útil e credível. Apesar de algumas discrepâncias obtidas nos ensaios desta peça, destaca-se o pormenor de apenas ter sido possível apresentar resultados de uma única amostra.

Para um estudo mais profundo e de modo a se poderem validar resultados, o correcto seria ter ensaiado uma considerável quantidade de peças para que se comprovasse uma tendência de resultados.

No entanto, não deixa de ser assinalável, que ao facilitar-se o processo de estampagem da peça, no segundo ensaio, os resultados obtidos se aproximam ainda mais dos resultados simulados.

Para além das variáveis já mencionadas nos capítulos anteriores, outra das variáveis que se deve ter em conta, é de que na simulação está a ser considerada uma superfície criada virtualmente que possui medidas exactas. Já na realidade partimos de um aço que é maquinado, ora, todo o processo de maquinação dos diversos componentes da ferramenta, mais o processo de interacção entre estes resulta na não exactidão de vários pormenores.

Ainda outro aspecto que condiciona os resultados, prende-se com o facto do software considerar os punções, matrizes e cerra-chapas como corpos rígidos. Na realidade e durante o processo, estes sofrem pequenas deformações que consequentemente podem levar a diferenças dos resultados teóricos.

7 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A principal conclusão a tirar deste trabalho é que a utilização da simulação numérica na construção de ferramentas permite a economia não só de custos como de tempo. Fazendo uso destas capacidades os projectistas já poderão prever quais as dificuldades com que se vão deparar, mas também já vão munidos de soluções para as ultrapassar.

O conjunto de soluções oferecidas por este tipo de softwares permite estudos profundos sobre cada caso, dando informações detalhadas e úteis.

Todo o trabalho apresentado neste relatório e desenvolvido ao longo deste estágio permite na fase de projecto imensa informação e pormenores que contribuem para um desenvolvimento do projecto de ferramentas mais rápido, mais preciso, e que necessitará posteriormente de menos e menores alterações na fase de ensaios, antes da produção

O trabalho realizado, com o recurso ao uso das simulações, permitiu um apoio constante ao Departamento de Construção de Ferramentas, algo que aparentemente não estaria tão implementado anteriormente, tendo ficado interiorizado o valor do trabalho realizado. Foi assim desta forma possível detectar com antecedência um futuro problema que surgiria na terceira operação da ferramenta estudada, e que atempadamente foi resolvido com as soluções encontradas através das simulações efectuadas. A detecção deste problema evitou que a ferramenta tivesse sido construída com esta falha, evitando-se aquela que seria uma enorme perda de tempo e um sobrecusto da ferramenta, o que poderia ter levado a ultrapassar não só o prazo de entrega acordado com o cliente como também o valor orçamentado para a sua execução. O modo como posteriormente se estudou a alteração dos embutidos, solicitada pelo cliente, as suas dificuldades e a alternativa apresentada pelo Departamento, mostraram capacidade de análise técnica e de apresentação de soluções, que de outra forma só mais tarde durante a modificação correspondente na ferramenta, teria sido detectada.

O estudo do processo de estampagem da segunda peça analisada permitiu detectar atempadamente as zonas de possível fissuração e solicitar a alteração da geometria da peça, antes de dar início ao projecto da respectiva ferramenta. Também neste caso é de realçar a potencialidade da simulação numérica na antecipação da detecção de falhas no processo de desenvolvimento de ferramentas.

Os resultados obtidos na validação das simulações face aos ensaios práticos permitem concluir da fiabilidade da sua utilização no desenvolvimento e concepção das ferramentas, apesar das condições dos testes levados a cabo não terem sido devidamente controladas face às condições da simulação.

Relativamente aos esforços obtidos ao longo do relatório, quer das simulações quer das fórmulas práticas, seria interessante a sua comprovação uma vez terminada a ferramenta.

O trabalho desenvolvido neste estágio deixa em aberto, como perspectiva de trabalho futuro, o acompanhamento do arranque da ferramenta na produção em série das peças, permitindo acompanhar as fases de try-out.

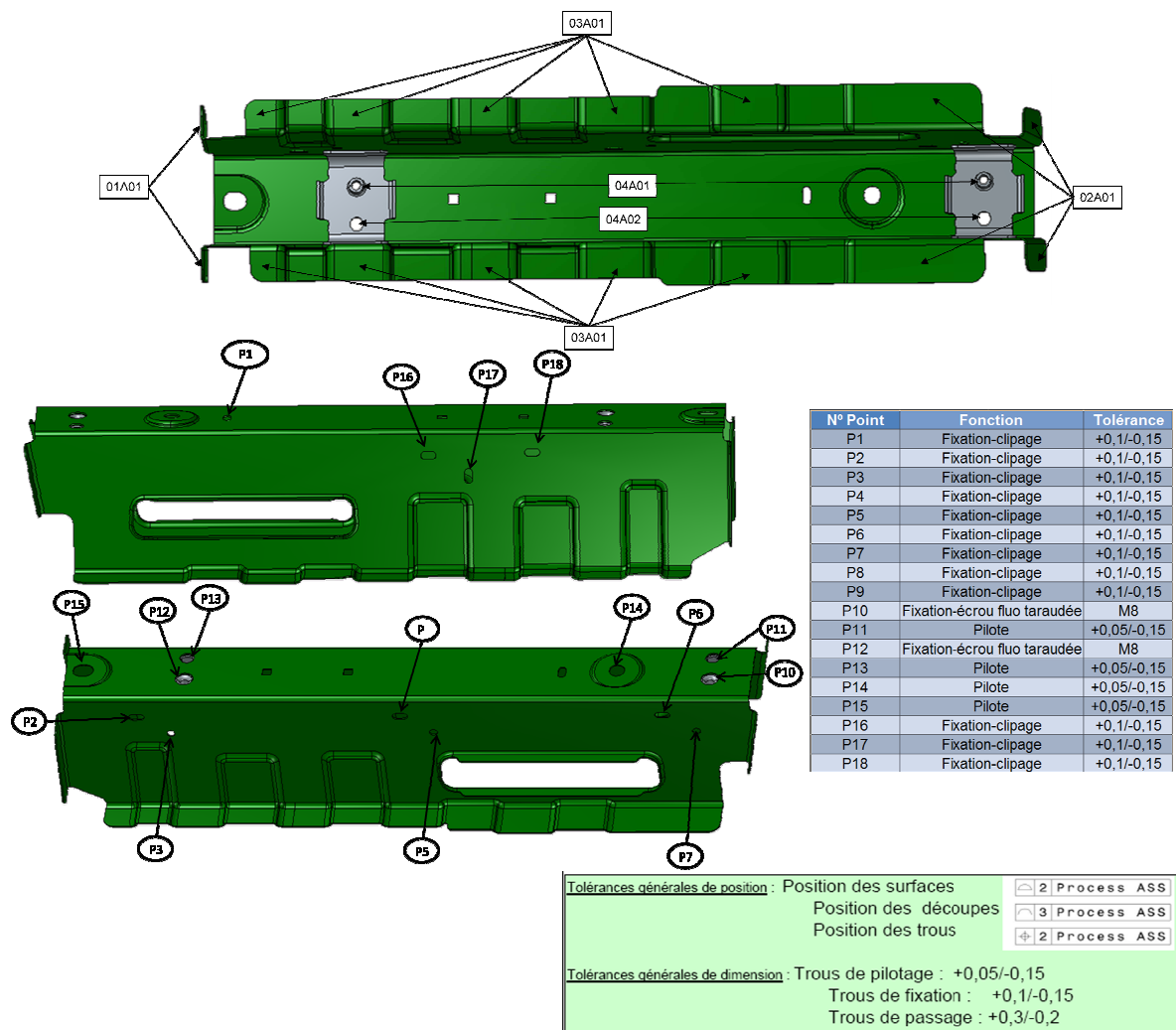
Outro aspecto que poderá ser considerado de interesse é a utilização do software de simulação na fase de orçamentação das ferramentas, permitindo acompanhar todo o desenvolvimento de uma ferramenta.

8 Referências

- [1] **Gestamp Aveiro**. 2010. <http://www.gestampaveiro.pt/> (accessed September 2010);
- [2] **Rossi, Mario**. 1971. Estampado en frio de la chapa – 9ª Edición. Hoepli Editorial Científico Médica;
- [3] **Vaz, Emanuel Eduardo Pires, João Pedro Barbosa Vaz, Hugo Filipe Barbosa Vaz**. 1987. Moldes, Cunhos e Cortantes Injecção de Plástico. Porto Edições Lopes da Silva – Editora;
- [4] **Pomey, Gilles, Paul Parnière**. Travail des métaux en feuilles;
- [5] **American Society for Metals**. Metals Handbook – 8th Edition, Vol 4, Forming. Taylor Lyman Editor;
- [6] **Santos, Abel Dias dos, J. Ferreira Duarte, A. Barata da Rocha**. 2005. Tecnologia da Embutidura, Edição INEGI, 2005;
- [7] **Rodrigues Jorge, Paulo Martins**. 2010. Tecnologia Mecânica – 2ª Edição. Escolar Editora;
- [8] **Hosford, William F., Robert M. Caddell**. 1993. Metal forming-mechanics and metallurgy;
- [9] **Fibro**. 2011. <http://www.fibro.com/> (accessed January 2011);
- [10] **Cardoso, Leandro Guimarães**. 2010. Actas de VII Conferência Nacional de Conformação de Chapas, pp. 123 – 143, Brasil
- [11] **Salzgitter-flachstahl**. 2011. <http://www.salzgitter-flachstahl.de/en/> (accessed January 2011)
- [12] **Kbsteel**. 2010. <http://www.kbsteel.biz/quality.htm> (accessed December 2010)
- [13] **AutoForm Workshop Manual**. 2010. AutoForm Forming Reality
- [14] **AutoForm Plus R2 Software Manual**. 2010. AutoForm Engineering GmbH
- [15] **Gestamp Aveiro, caderno de encargos, ferramentas de estampagem**. 2010
- [16] **T. Schönbach**, (2010), Simulation techniques for robust process layout of hot forming processes, International Deep Drawing Research Group Conference – IDDRG 2010, , May 31 – June 02, Graz, Austria.

Anexo A - Tolerâncias da peça apresentada no capítulo 4

Code de la caractéristique	Libellé de la caractéristique	Nature de la caractéristique	Critères à respecter			
			IT-	IT+	Phase convergence IT	
					Proposition IT-	Proposition IT+
01A01	Position des surfaces	caractéristique géométrique	-0,5	0,5	-0,7	0,7
02A01	Position des surfaces	caractéristique géométrique	-0,5	0,5	-1	-1
03A01	Position des surfaces	caractéristique géométrique	-0,5	0,5	-0,7	0,7
04A01	Position des poinçonnages (filétages)	caractéristique géométrique	-0,5	0,5	-0,7	0,7
04A02	Position du poinçonnage	caractéristique géométrique	-0,5	0,5	-0,7	0,7



Anexo B - Norma de Marcação do grupo PSA Peugeot Citroën

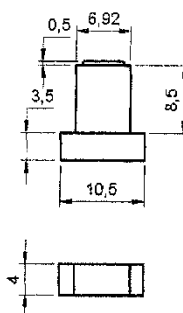
Anexo C - Norma do Porta Caracteres Tipo T

CARACTERES

Caracteres de marcação tipo T
Porta Caracteres tipo T
 (altura de texto 5 mm)

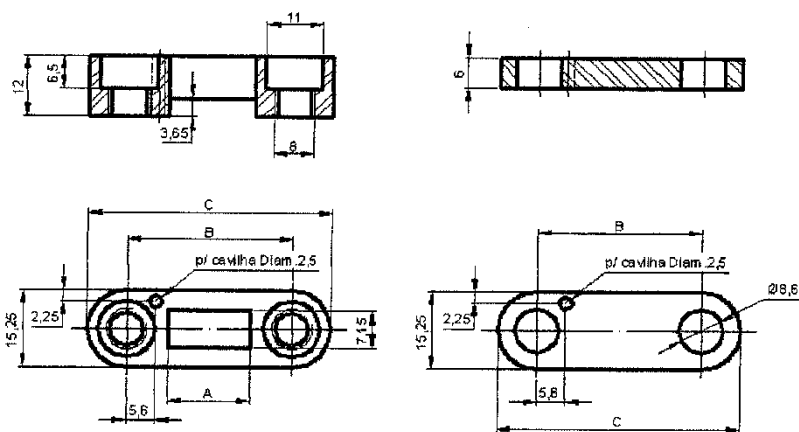
Aço

Aço temperado



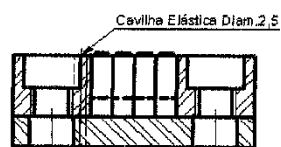
Dureza

58-60 HRC



Execução

Temperado - retificado



		Número de caracteres			
		4	6	8	10
Cotas	A	16,1	24,1	32,1	40,1
	B	32	40	48	56
	C	47	55	63	71